



Edson Márcio
Cadete Braz

**Análise de quinadora e estudo da recuperação
elástica das chapas quinadas em V no ar**



**Edson Márcio
Cadete Braz**

**Análise de quinadora e estudo da recuperação
elástica das chapas quinadas em V no ar**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Rui Pedro Ramos Cardoso, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais e aos meus irmãos, com cujo apoio incondicional pude sempre contar, pelo incentivo e compreensão pela minha longa ausência ao longo destes anos

o júri
Presidente

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Rui Pedro Ramos Cardoso

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço, desde já, aos meus orientadores, Professor Dr. Rui Pedro Ramos Cardoso e ao Professor Francisco Queirós de Melo pela disponibilidade, incentivo e dedicação demonstradas no decorrer do trabalho.

A Total E&P Angola pelo apoio e incentivos nestes últimos dois anos.

Agradeço, igualmente, a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho, entre eles, colegas, amigos e professores da Universidade de Aveiro.

Palavras-chave

Quinagem de chapas metálicas, recuperação elástica, análise estrutural, método dos elementos finitos.

Resumo

O objectivo desta tese foi o de estudar o processo de quinagem de chapas metálicas finas e a sua recuperação elástica. Dada a importância deste processo tecnológico de produção de componentes a partir da deformação plástica por dobragem (vulgarmente conhecida como quinagem) de chapas metálicas, foi propósito investigar neste trabalho o sistema de forças necessárias à obtenção de elementos estruturais quinados em função do comportamento constitutivo do material e de geometria de alguns componentes das ferramentas deste processo de fabrico. Um estudo complementar consistiu em referir a constituição da estrutura resistente de máquinas quinadoras, bem como os principais sistemas de accionamento. Outro objectivo deste trabalho foi o estudo do fenómeno da recuperação (*springback*) elástica das chapas, onde se verifica a influência que os parâmetros do processo de quinagem têm sobre este fenómeno.

Keywords

Sheet metal bending, springback, structural analysis, finite element method.

Abstract

The leading objective of this thesis consists on the study of the mechanism for bending of thin metal sheet in order to obtain folded structural profiles with broad application in structural design. Given the importance of the technologic process in the production of thin metal sheet profiles, the force system necessary to develop the process, depending on the constitutive behavior of the material was studied with detail. Also, a complementary analysis of the engineering design of press brake structures was carried out, as well as the power systems used in the machine operation. Another objective of this work was to study the phenomenon of springback of the sheet metal, where is possible to verify the influence of the bending parameters on this phenomenon.

Índice

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DA TESE.....	2
2. TECNOLOGIA DE OPERAÇÕES DE QUINAGEM DE CHAPA METÁLICA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. TIPOS DE QUINADORAS.....	6
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE QUINAGEM	10
2.3.1. <i>Quinagem ao longo de um eixo linear</i>	11
2.4. CONSIDERAÇÕES ESSENCIAIS DO DESENHO ESTRUTURAL DE QUINADORAS	14
3. CONCEITOS TEÓRICOS	21
3.1. TEORIA DA FLEXÃO NO DOMÍNIO PLÁSTICO	21
3.2. FIBRA NEUTRA/LINHA NEUTRA.....	21
3.3. FLEXÃO DE PEÇAS DIREITAS	23
3.3.1. <i>Distribuição de tensões</i>	23
3.3.2. <i>Deformações</i>	26
3.3.3. <i>Recuperação elástica (efeito de mola ou springback)</i>	29
3.3.4. <i>Ângulo de recuperação elástica</i>	31
4. MODELAÇÃO ANALÍTICA.....	33
4.1. PROJECTO DE PEÇAS UTILIZANDO QUINAGEM EM V NO AR	33
4.1.1. <i>Cálculo da dimensão da estampa plana</i>	33
4.1.2. <i>Raio mínimo de quinagem</i>	35
4.1.3. <i>Variáveis das ferramentas no processo de quinagem no ar</i>	39
4.1.4. <i>Dimensão da aba mínima de quinagem</i>	40
4.1.5. <i>Recuperação elástica</i>	40
4.1.6. <i>Profundidade de quinagem</i>	44
5. ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUINADORAS.....	47
5.1. INTRODUÇÃO	47
5.2. MONTANTES	50
5.3. AVENTAL MÓVEL E FIXO	51
5.4. OPTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	53
6. MODELAÇÃO DO PROCESSO DE QUINAGEM EM V NO AR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	56
6.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	56
6.2. CONSIDERAÇÕES	57
6.3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	58

6.4.	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS	62
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
7.1.	INTRODUÇÃO	65
7.2.	EFEITOS DA ESPESSURA DA CHAPA	65
7.2.1.	<i>Efeitos da espessura da chapa na recuperação elástica</i>	<i>65</i>
7.3.	EFEITO DO RAO DA PONTA DO PUNÇÃO/RAIO DO CUNHO	68
7.3.1.	<i>Efeitos do raio do punção na recuperação elástica</i>	<i>68</i>
7.4.	EFEITO DA ABERTURA DA MATRIZ	72
7.4.1.	<i>Efeito da abertura da matriz na recuperação elástica</i>	<i>72</i>
7.5.	EFEITO DA PROFUNDIDADE DE QUINAGEM	75
7.5.1.	<i>Efeito da profundidade de quinagem na recuperação elástica</i>	<i>75</i>
7.6.	EFEITO DO ATRITO	79
7.6.1.	<i>Efeito do atrito na recuperação elástica</i>	<i>79</i>
7.7.	EFEITO DO MATERIAL DA CHAPA.....	80
7.7.1.	<i>Efeito do tipo material da chapa na recuperação elástica</i>	<i>80</i>
7.8.	FORÇA DE QUINAGEM	83
8.	CONCLUSÃO	85
8.1.	CONCLUSÕES GERAIS	85
8.2.	TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXOS	89
	ANEXO A. COTAGEM DOS COMPONENTES UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL DA QUINADORA	89
	A.1 Montante.....	89
	A.2 Montante otimizado.....	90
	A.3 Avental móvel	91
	A.4 Avental fixo	91
	A.5 Avental fixo otimizado	92

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 REPRESENTAÇÃO DE ALGUMAS FORMAS POSSÍVEIS DE OBTER POR QUINAGEM.	5
FIGURA 2.2 A) QUINADORA HIDRÁULICA (CORTESIA DA EMPRESA ADIRA – A. DIAS RAMOS), B) DETALHE DE UMA OPERAÇÃO DE QUINAGEM.	6
FIGURA 2.3 QUINADORA MANUAL.	7
FIGURA 2.4 A) QUINADORA MECÂNICA[3], B) DETALHE DO SISTEMA DE ACCIONAMENTO DE UMA QUINADORA MECÂNICA[2].	7
FIGURA 2.5 CICLO DE QUINAGEM COM ACCIONAMENTO MECÂNICO DA QUINADORA[2].	8
FIGURA 2.6 A) QUINADORA HIDRÁULICA[3], B) DETALHE DO ESQUEMA DE ACCIONAMENTO DE UMA QUINADORA HIDRÁULICA[2].	9
FIGURA 2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO SEGUNDO A NORMA DIN 8582[4].	10
FIGURA 2.8 QUINAGEM NO AR (AIR BENDING).	12
FIGURA 2.9 QUINAGEM EM V (VBENDING).	12
FIGURA 2.10 QUINAGEM A FUNDO (BOTTOMING).	13
FIGURA 2.11 A) QUINAGEM EM U: A) SEM ENCOSTADOR, B) COM ENCOSTADOR.	13
FIGURA 2.12 QUINAGEM ROTATIVA.	14
FIGURA 2.13 QUINAGEM DE FLANGE COM PUNÇÃO DE ARRASTE (WIPING DIE BENDING).	14
FIGURA 2.14 ESQUEMA DO MODO OPERATIVO DE QUINAGEM DE CHAPA.	15
FIGURA 2.15 QUINADORA ADIRA S.A. (PORTUGAL) COM AVENTAL SUPERIOR MÓVEL (DOWNSTROKING PRESS BRAKE).	16
FIGURA 2.16 ILUSTRAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA QUINADORA.	17
FIGURA 2.17 ESQUEMA DOS MÓDULOS INTEGRANDO A ESTRUTURA RESISTENTE DE UMA QUINADORA DE AVENTAL SUPERIOR MÓVEL (DOWNSTROKING PRESS BRAKE).	17
FIGURA 2.18 QUINADORA PROMECAM (FRANÇA) COM AVENTAL INFERIOR MÓVEL (UPSTROKING PRESS-BRAKE). ESTA SOLUÇÃO É USADA EM MÁQUINAS DE PEQUENA CAPACIDADE.	18
FIGURA 2.19 EXEMPLO DE QUINAGEM MÚLTIPLA: UMA BOA ESCOLHA DA SEQUÊNCIA PERMITE RETIRAR O PERFIL SEM PROBLEMAS; A SEQUÊNCIA ERRADA PODE BLOQUEÁ-LO NO AVENTAL E PUNÇÃO.	19
FIGURA 2.20 SOLICITAÇÃO PRINCIPAL A CONSIDERAR PARA O PROJECTO DA ESTRUTURA RESISTENTE DE QUINADORAS.	20
FIGURA 3.1 DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL DAS FIBRAS AB E CD DE UMA PEÇA SOLICITADA A FLEXÃO POR UM MOMENTO M E POR UMA FORÇA AXIAL F[7].	22
FIGURA 3.2 DISTRIBUIÇÃO DE EXTENSÕES CONSIDERADAS NA FLEXÃO[8].	23
FIGURA 3.3 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA FLEXÃO DE PURA DE UMA PEÇA DIREITA.	23
FIGURA 3.4 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA A FLEXÃO PURA DE UMA PEÇA DIREITA PARA UMA SOLICITAÇÃO COM UM MOMENTO ELÁSTICO.	24
FIGURA 3.5 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA A FLEXÃO PURA DE UMA PEÇA DIREITA PARA UMA SOLICITAÇÃO COM UM MOMENTO ELASTO-PLÁSTICO[7].	25
FIGURA 3.6 FORÇAS MÉDIAS RESULTANTES DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES[7].	25
FIGURA 3.7 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA A FLEXÃO PURA DE UMA PEÇA DIREITA PARA UMA SOLICITAÇÃO COM UM MOMENTO ELASTO-PLÁSTICO[7].	26
FIGURA 3.8 EVOLUÇÃO DA CURVATURA COM O MOMENTO APLICADO[7].	27
FIGURA 3.9 ROTAÇÃO DAS SECÇÕES MEDIANTE A APLICAÇÃO DE UM MOMENTO PURO[7].	29
FIGURA 3.10 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA (EFEITO DE MOLA OU <i>SPRINGBACK</i>) [7].	30
FIGURA 3.11 VARIAÇÃO DA CURVATURA DURANTE A RETIRADA DA SOLICITAÇÃO EM FUNÇÃO DO CARREGAMENTO APLICADO DURANTE A FLEXÃO[7].	30
FIGURA 3.12 ROTAÇÃO SOFRIDA PELAS SECÇÕES DURANTE A RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	31
FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO DA LINHA NEUTRA NO PROCESSO DE DOBRAGEM.	33
FIGURA 4.2 CÁLCULO DA ESTAMPA PLANA PARA DIFERENTES GEOMETRIAS CONSIDERADAS SEGUNDO A NORMA DIN 6935, PARA ÂNGULO DE ABERTURA DAS ABAS (b) ENTRE: A) 0 E 90°, B) 90 E 165° E C) 165 E 180°[1].	34
FIGURA 4.3 REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL.	35

FIGURA 4.4 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE QUINAGEM DE CHAPA[1].....	36
FIGURA 4.5 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DAS FERRAMENTAS NO PROCESSO DE QUINAGEM NO AR[1].	39
FIGURA 4.6 REPRESENTAÇÃO DA ABA MÍNIMA DE QUINAGEM[1].	40
FIGURA 4.7 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FENÔMENO DA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA[1].	41
FIGURA 4.8 TENSÕES RESIDUAIS NA QUINAGEM CONSIDERANDO QUE A FLEXÃO PLÁSTICA FOI REALIZADA POR UM MOMENTO FLECTOR[1].	41
FIGURA 4.9 ROTAÇÃO SOFRIDA PELAS SECÇÕES DURANTE A RECUPERAÇÃO ELÁSTICA[1].....	42
FIGURA 4.10 REPRESENTAÇÃO DA PENETRAÇÃO DO PUNÇÃO NA MATRIZ[1].	45
FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES NOS MÓDULOS DOS MONTANTES (TRATADOS COMO VIGAS DE ELEVADA ALTURA).	47
FIGURA 5.2 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES (A) E DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (B), PARA FORÇA APLICADA O TIPO DE CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA CONSIDERADAS.	50
FIGURA 5.3 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES (A) E DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (B), PARA FORÇA APLICADA UNIFORMEMENTE SOBRE OS BORDOS SUPERIOR E INFERIOR E RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA CONSIDERADAS.	51
FIGURA 5.4 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES E DO DESLOCAMENTO DO AVENTAL MÓVEL (A) E (B) E DO AVENTAL FIXO (c) E (d).	53
FIGURA 5.5 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES E DO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELO AVENTAL FIXO OPTIMIZADO.	54
FIGURA 5.6 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES E DO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELO(S) MONTANTE(S) OPTIMIZADO(S).	55
FIGURA 6.1 MODELO GEOMÉTRICO UTILIZADO PARA A SIMULAÇÃO.	58
FIGURA 6.2 REPRESENTAÇÃO DA CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO LINEAR ELÁSTICA E ENCRUAMENTO.	59
FIGURA 6.3 CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DO ALUMÍNIO AL2024-T3[13].	60
FIGURA 6.4 CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DO AÇO AISI 1010[13].	61
FIGURA 6.5 ELEMENTO 11 (4 NÓS E 4 PONTOS DE INTEGRAÇÃO)[19].	63
FIGURA 6.6 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA APLICADAS A CHAPA.	63
FIGURA 6.7 REPRESENTAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA UTILIZADAS PARA A SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE QUINAGEM EM V.	64
FIGURA 7.1 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CHAPA.	66
FIGURA 7.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CHAPA NA TENSÃO DE VON MISES: A) ESPESSURA 7MM, C) ESPESSURA 5MM, E) ESPESSURA 3MM; E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE: B) ESPESSURA 7MM, D) ESPESSURA 5MM, F) ESPESSURA 3MM.	68
FIGURA 7.3 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA EM FUNÇÃO DO RAI DO PUNÇÃO.	69
FIGURA 7.4 INFLUÊNCIA DO RAI DO PUNÇÃO NA TENSÃO DE VON MISES: A) RAI 2MM, C) RAI 3MM, E) RAI 5MM; E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE: B) RAI 2MM, D) RAI 3MM, F) RAI 5MM.	71
FIGURA 7.5 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA EM FUNÇÃO DA ABERTURA DA MATRIZ.	72
FIGURA 7.6 INFLUÊNCIA DA ABERTURA DA MATRIZ (V) NA TENSÃO DE VON MISES: A) V = 6H, C) V = 8H, E) V = 10H, G) V = 12H; E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE: B) V = 6H, D) V = 8H, F) V = 10H, H) V = 12H.	75
FIGURA 7.7 EFEITO DA PROFUNDIDADE DE QUINAGEM NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	76
FIGURA 7.8 INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE QUINAGEM (P) NA TENSÃO DE VON MISES: A) P = 9MM, C) P = 15 MM, E) P = 22 MM; E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE: B) P = 9MM, D) P = 15 MM, F) P = 22 MM.	78
FIGURA 7.9 ENERGIA DE DEFORMAÇÃO ELÁSTICA.	79
FIGURA 7.10 EFEITO DO ATRITO NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	80
FIGURA 7.11 EFEITO DO TIPO DE MATERIAL NA TENSÃO DE VON MISES: A) AISI 1010, C) AL2024-T3; E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE: B) AISI 1010, D) AL2024-T3.	82
FIGURA 7.12 COMPARATIVO DA ENERGIA DE DEFORMAÇÃO ELÁSTICA ENTRE O AÇO AISI 1010 E O ALUMIO AL2024-T3.	83
7.13 PERFIL DE FORÇA DE QUINAGEM, NECESSÁRIA PARA CONFORMAÇÃO DE CHAPA DE 3 MM DE ESPESSURA, EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS DE QUINAGEM CONSIDERANDO UM PUNÇÃO COM 3MM DE RAI.	84

FIGURA 7.14 PERFIL DE FORÇA DE QUINAGEM, NECESSÁRIA PARA CONFORMAÇÃO DE CHAPA DE 5 MM DE ESPESSURA, EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS DE QUINAGEM CONSIDERANDO UM PUNÇÃO COM 3MM DE RAIO..... 84

Índice de Tabelas

TABELA 4.1 VALORES DE C PARA DETERMINAÇÃO DO RAO MÍNIMO DE QUINAGEM[1].	38
TABELA 4.2 VALORES RECOMENDADOS PARA O RAO INTERIOR DE QUINAGEM (DIN 6935).	38
TABELA 4.3 FACTOR DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA[1].	44
TABELA 5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO St37.	49
TABELA 5.2 REPRESENTAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO DE VON MISES E DE DESLOCAMENTO.	52
TABELA 5.3 VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO, DESLOCAMENTO E PESO PARA AO AVENTAL FIXO ORIGINAL E OPTIMIZADO.	54
TABELA 5.4 VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO, DESLOCAMENTO E PESO PARA O MONTANTE ORIGINAL E OPTIMIZADO.	55
TABELA 6.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO AL2024-T3[13].	60
TABELA 6.2 VALORES DO COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (K) EM [MPa] E COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (N), PARA O ALUMÍNIO [13].	60
TABELA 6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 1010[18].	61
TABELA 6.4 VALORES DO COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (K) EM [MPa] E COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (N), PARA O AÇO[18].	61
TABELA 7.1 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO EFEITO DA ESPESURA DA CHAPA NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	65
TABELA 7.2 EFEITO DA ESPESURA DA CHAPA NA TENSÃO DE VON MISES E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MÁXIMA.	66
TABELA 7.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO EFEITO DO RAO DO PUNÇÃO NO FENÓMENO DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	69
TABELA 7.4 EFEITO DO RAO DO PUNÇÃO NA TENSÃO DE VON MISES E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MÁXIMA.	70
TABELA 7.5 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO EFEITO DA ABERTURA DA MATRIZ NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	72
TABELA 7.6 EFEITO DA ABERTURA DA MATRIZ NA TENSÃO DE VON MISES E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MÁXIMA.	73
TABELA 7.7 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DA PROFUNDIDADE DE QUINAGEM NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	75
TABELA 7.8 TENSÃO DE VON MISES E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MÁXIMA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.	76
TABELA 7.9 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO EFEITO DO COEFICIENTE DE ATRITO NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	79
TABELA 7.10 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O ESTUDO DO EFEITO DO COEFICIENTE DE ATRITO NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.	81
TABELA 7.11 EFEITO DO TIPO DE MATERIAL NA TENSÃO DE VON MISES E NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.	81

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objectivos

A descoberta do metal cerca de 6000 anos antes de Cristo foi uma das maiores conquistas dos tempos antigos – equiparável à importância da invenção da roda. Com a descoberta da fundição, começa-se a proliferação da indústria da extracção de minério.

No início do século XVIII, a arte da metalurgia teve um impulso assegurado com a revolução industrial. A evolução da química moderna trouxe uma maneira nova e mais fácil de produção de aço, que foi possível a partir de equipamentos de injeção forçada de oxigénio, chamados de convertidores (a invenção é devida a Henry Bessemer, patente em 1855).

No final do século XVIII deu-se o aparecimento da chapa metálica produzida essencialmente por laminadores, porém de fraca qualidade e consistência, pelo que, somente no final do século XX com o acesso às novas tecnologias, nomeadamente equipamentos de precisão computadorizados, se conseguiu uma melhoria da qualidade das chapas metálicas produzidas.

Com o acesso a novas tecnologias, como por exemplo, processos de estampagem, *hydroforming* e quinagem de chapa, têm sido dadas contribuições importantes para o desenvolvimento da indústria no que se refere à conformação de chapas de aço.

O objectivo do tema proposto neste trabalho refere-se à análise estrutural de uma máquina ferramenta bastante utilizada na indústria da conformação de chapa metálica, para a fabricação de perfis industriais. Concretamente, trata-se de uma quinadora hidráulica, em que um punção de geometria adequada vai efectuar a flexão em três pontos de uma chapa em que uma das dimensões (o comprimento) é muito maior que as restantes (largura e espessura). O estudo da deformação da chapa metálica será realizado por modelos numéricos simples (consistindo estes na hipótese de geração progressiva de rótulas plásticas) e comparado com simulação por elementos finitos de formulação não linear material e geométrica.

Este tema tem igualmente o objectivo de analisar o processo de quinagem em V no ar, assim como, o fenómeno da recuperação elástica que as chapas metálicas, de uma maneira geral apresentam no processo de conformação plástica de chapa por quinagem. Esta recuperação elástica é um factor adverso à qualidade dimensional, uma vez que falseia as dimensões previstas pelo projectista. Importa pois, estudar com pormenor este

fenómeno, sendo para tal considerados alguns parâmetros do processo de quinagem e verificada a influência dos mesmos sobre a recuperação elástica das chapas.

Este trabalho permitirá obter um conjunto de resultados de grande importância consistindo na apresentação de ábacos e gráficos necessários a um operador destas máquinas, possibilitando a determinação prévia da força máxima em função de algumas características e dimensões da chapa a conformar. Devido à complexidade dos componentes e mecanismos presentes nestas estruturas, torna-se essencial perceber a distribuição do campo de deslocamentos, deformações e tensões de forma a melhor se compreender e assim otimizar as estruturas destas máquinas. O objectivo final da investigação proposta enquadra-se na optimização do desenho das referidas estruturas. Para o efeito, serão realizadas diversas simulações numéricas recorrendo ao método dos elementos finitos, em análise não linear geométrica e material e com contacto entre as ferramentas e a chapa a conformar.

1.2. Organização da estrutura da tese

A organização do texto apresenta-se da seguinte maneira:

O capítulo 1 apresenta as linhas gerais da história do desenvolvimento de materiais metálicos e processos de fabrico, com incidência na quinagem de chapa em aplicações industriais.

O capítulo 2 descreve a cinemática e geometria do processo de quinagem, com incidência no desenho de matrizes e punções, assim como a variação geométrica progressiva da chapa em conformação. Por experiência adquirida, quer por construtores quer por investigação laboratorial, muitos parâmetros de quinagem encontram-se disponíveis em normas industriais, às quais têm garantido um apoio bem sucedido ao fabrico por este processo tecnológico. Dada a importância deste assunto, ele tem extensão na descrição mais pormenorizada dos métodos de construção das quinadoras, uma vez que o projecto bem sucedido para estes equipamentos determinará a produtividade, flexibilidade de geometria e qualidade dimensional dos perfis produzidos. As soluções construtivas das quinadoras são aqui resumidas, referindo-se apenas por interesse histórico, máquinas de accionamento mecânico actualmente muito raras. Por fim, são resumidas em linhas gerais as soluções construtivas actualmente adoptadas na construção do corpo da quinadora.

O capítulo 3 pormenoriza o mecanismo geométrico e estrutural para a flexão progressiva em regime plástico da chapa metálica sob quinagem. Aqui destaca-se a evolução do estado de tensão em função de critérios simplificados para o dano de chapa em flexão, sendo pois possível por equilíbrio da estrutura e relação constitutiva do material, obter a evolução da força necessária no punção.

No capítulo 4 aborda-se o problema da geometria da chapa na etapa pós quinagem, onde se estabelece a relação entre o comprimento das fibras antes e depois da conformação. Esta etapa necessita naturalmente da selecção criteriosa dos parâmetros de quinagem, pelo que se apresenta um conjunto de dados sob forma de tabela para as características geométricas do punção que garantem o mínimo de defeitos no produto.

O capítulo 5 apresenta-se uma síntese da análise estrutural de quinadoras. O projecto e técnicas de construção da estrutura resistente da máquina têm indiscutíveis repercussões na geometria final do perfil a obter. Com efeito, a precisão do produto depende da estabilidade geométrica da máquina, ou seja de uma elevada rigidez. Contudo um projecto visando esta meta levaria a um resultado dispendioso uma vez que alguma flexibilidade no corpo da máquina não irá afectar desfavoravelmente a precisão dos perfis e permite obter economia no peso de material necessário. Uma regra empírica adoptada quase universalmente consiste em estabelecer a meio vão da máquina um deslocamento elástico associado ao máximo esforço que a quinadora pode efectuar para uma quinagem equidistante dos extremos (a meio vão). Descreve-se em pormenor este critério no capítulo 2 o qual permite simplificar de modo assinalável as técnicas de projecto estrutural para estas máquinas.

O capítulo 6 constitui uma das etapas mais importantes, na medida em que efectua a simulação numérica do processo de quinagem utilizando elementos finitos capazes de modelar grandes deformações com técnicas de estabilização numérica do campo de deslocamentos. O material é caracterizado pela relação constitutiva e um critério de cedência permite a modelação da transição de deformação elástica para plástica no processo de quinagem. Este capítulo apresenta pois exemplos simulados com contacto em ferramentas rígidas (matriz e punção) caracterizando realisticamente a evolução geométrica da peça durante a quinagem.

No capítulo 7 apresenta-se uma síntese dos resultados referentes à simulação numérica, uma vez que este capítulo constitui o ponto fulcral desta tese. Neste ponto foi

apenas objectivo caracterizar as forças geradas durante o processo de quinagem, assim como a presença da recuperação elástica (*springback*). Neste trabalho deixamos pois em aberto o tema da proposta de soluções para minimizar a recuperação elástica. Não se deixa contudo de mencionar que muito trabalho positivo tem sido obtido por técnicas de engenharia inversa, à qual consiste em obter ferramentas matemáticas de caracterização do retorno elástico a partir da adaptação a resultados experimentalmente obtidos.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões gerais do estudo efectuado e um conjunto de ideias e sugestões para trabalhos futuros

2. Tecnologia de operações de quinagem de chapa metálica

2.1. Introdução

A quinagem de chapas metálicas é um processo de alteração de forma que consiste na deformação plástica do material permitindo o fabrico de superfícies planificáveis de geometria variada, como por exemplo, geometria cilíndrica, cónica ou prismática (Figura 2.1).

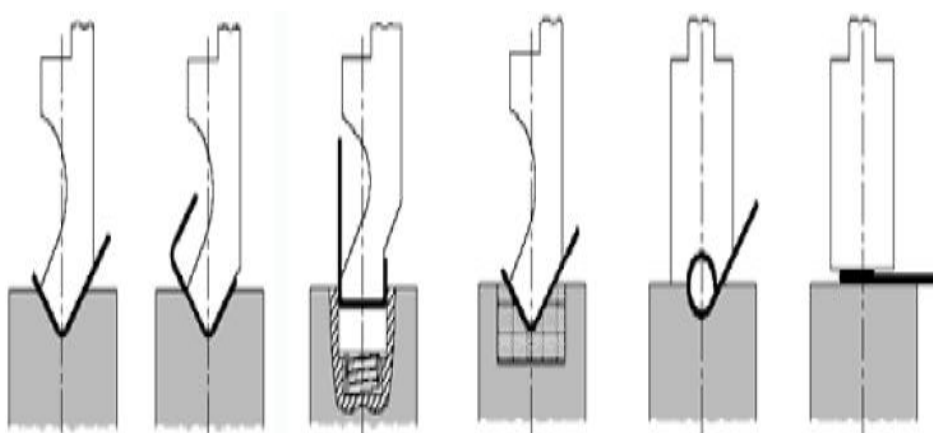


Figura 2.1 Representação de algumas formas possíveis de obter por quinagem.

A quinagem de chapa metálica é um processo muito flexível, usado industrialmente para produção de uma variedade de formas, como por exemplo, para a obtenção de perfis (L, U, ou V), tubos e barras, consistindo basicamente na dobragem uniforme de chapas metálicas em torno de um eixo linear.

Este processo é sobretudo aplicado a pequenas séries de fabrico. No entanto, com o desenvolvimento de quinadoras industriais (figura 2.2a), associado à robótica e à utilização de máquinas ferramenta complementares para o apoio à produção, tem sido possível a sua integração em linhas de produção em série. Através deste processo, consegue-se obter geometrias variadas, desde as mais simples as mais complexas, tendo um campo de aplicação bastante diverso, como por exemplo na indústria automóvel e aeronáutica, fabrico de balcões frigoríficos, estruturas metálicas para painéis de casas pré-fabricadas, etc[1].

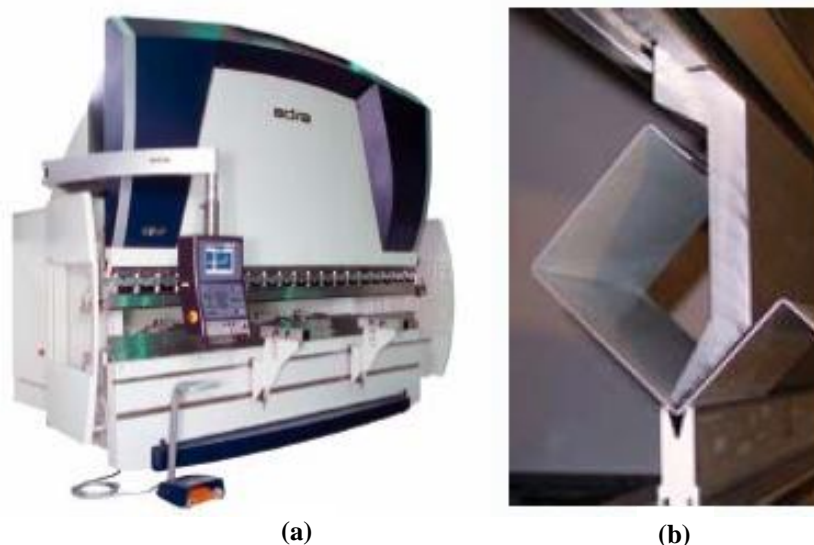


Figura 2.2 a) Quinadora hidráulica (cortesia da empresa Adira – A. Dias Ramos), b) detalhe de uma operação de quinagem.

2.2. Tipos de quinadoras

O processo de quinagem de chapas metálicas pode ser efectuado manualmente ou por via de máquinas. Quando a operação é realizada manualmente, utilizam-se para o efeito desde ferramentas adequadas e quinadoras manuais.

Existem dois tipos principais de quinadoras, que são classificadas consoante a natureza dos seus sistemas de accionamento, ou seja: mecânico ou hidráulico.

A escolha de utilização de um ou outro tipo de quinadora a utilizar, seja manual, mecânica ou hidráulica, depende das necessidades de produção.

Quinadora manual

As quinadoras manuais são máquinas accionadas manualmente e de grande uso nas indústrias para a produção de perfis, armários etc. Estas máquinas funcionam mediante a aplicação da força de um ou mais operadores. Na figura 2.3 ilustra-se uma quinadora manual. Para operar essas máquinas, o trabalhador precisa ter conhecimentos de cálculo de dobra, de preparação do material e de ajuste da máquina. Dependendo do trabalho a realizar, as chapas são dobradas com o auxílio de dispositivos especiais, existentes ou adaptados à quinadora [2].

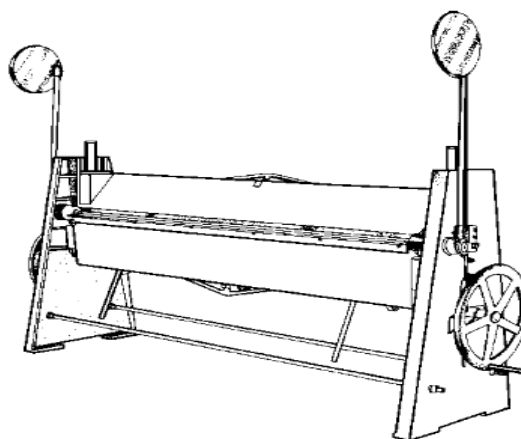
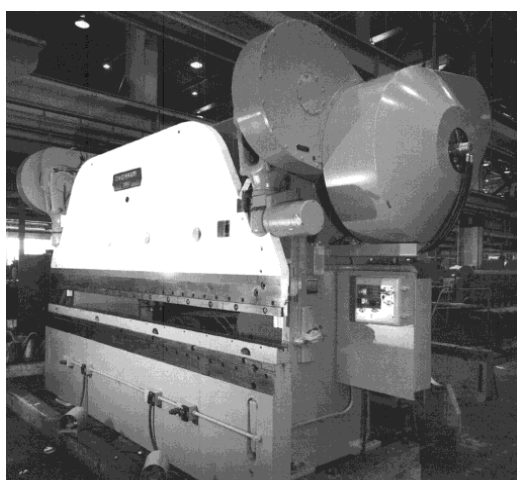


Figura 2.3 Quinadora manual.

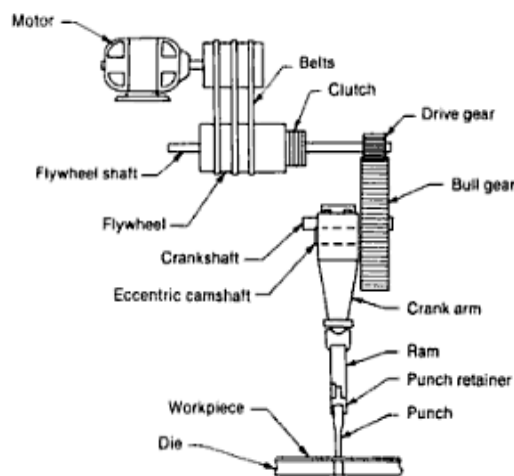
Quinadora mecânica

As quinadoras mecânicas caracterizam-se por possuírem um accionamento mecânico, o qual se pode dever à instalação de sistemas de biela-manivela e um redutor de engrenagens que assegure uma velocidade de funcionamento compatível com a operação de conformação de chapa. Este tipo de máquinas já se encontra desactualizado, uma vez que a necessidade de se obter grandes forças de conformação obriga a um sistema cinemático de grandes dimensões, com destaque para um volante de inércia e engrenagens de grande módulo.

Estas quinadoras são geralmente de acção rápida, ou seja, a força é aplicada em períodos de curta duração, contrariamente as quinadoras com accionamento hidráulico que apesar de serem mais lentas, a força empregue para a quinagem pode ser aplicada durante períodos de tempo mais longos.



(a)



(b)

Figura 2.4 a) Quinadora mecânica[3], b) detalhe do sistema de accionamento de uma quinadora mecânica[2].

Durante o ciclo de quinagem, o avental móvel é accionado pelo braço da manivela até ao fim do curso e depois regressa ao topo.

Nas operações em contínuo, o avental pode ser accionado rapidamente e efectuar dobras com relativa velocidade, devido à vantagem que constitui o mecanismo biela manivela e o armazenamento de energia no volante de inércia, para o accionamento mecânico.

A capacidade de trabalho destes sistemas de accionamento é traduzida em termos de carga disponível no avental durante a quinagem, sendo definidos por fabricantes deste tipo de equipamentos, dois pontos de referência fundamentais para a carga disponível, nomeadamente, o médio e o fim de curso. Esta carga é diferente nos dois cursos, sendo cerca de dois terços da carga total disponível no final do curso do avental, devido ao facto do mecanismo biela manivela não se encontrar na sua posição de trabalho ideal. À medida que a manivela vai movimentando o avental para baixo, a partir do médio curso, a carga disponível vai aumentando lentamente, e até perto do fim de curso dá-se um crescimento mais rápido dessa carga[2].

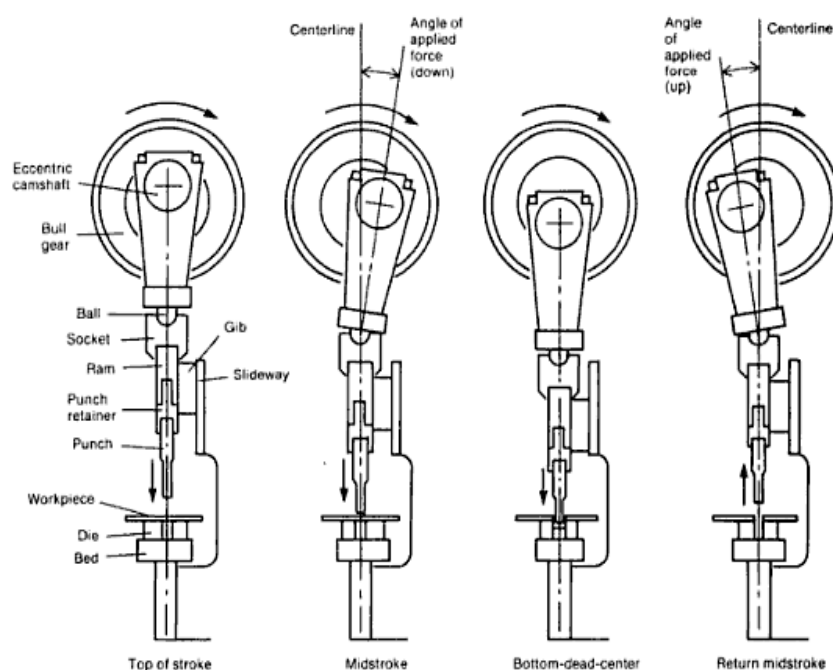


Figura 2.5 Ciclo de quinagem com accionamento mecânico da quinadora[2].

Quinadora hidráulica

Este tipo de quinadoras, difere das anteriores basicamente no que se refere ao sistema de accionamento, que para este tipo é hidráulico. O sistema de accionamento destas máquinas é constituído por um motor, uma bomba, um sistema de válvulas e um cilindro hidráulico com pistões conectados ao avental móvel. Todavia, este sistema de accionamento, é relativamente menos complexo do que o sistema de accionamento usado nas quinadoras mecânicas.

Os cilindros utilizados são geralmente de dupla acção, ou seja, o óleo é bombeado sob pressão na parte superior do cilindro (acima do pistão), para fazer deslocar o avental para baixo. Para fazê-lo subir, o óleo é bombeado na parte inferior do cilindro, sob o pistão. Com óleo sob pressão acima e abaixo do pistão, consegue-se que o pistão fique parado em qualquer posição durante a operação de quinagem. Os sistemas de accionamento hidráulicos destas quinadoras são projectados de maneira que, a pressão do óleo na parte inferior do pistão seja geralmente 10 e 15% superior a pressão do óleo acima do pistão. Tal é realizado, para impedir o avental de cair por gravidade e também para ajudar a controlar o avental durante a operação de quinagem. O movimento descendente do avental móvel, é assegurado pelo aumento de pressão do óleo que entra no topo do cilindro, sendo muito maior a pressão do óleo no topo do pistão do que a pressão do óleo abaixo do pistão. O movimento ascendente do avental é causado pela mesma acção mas em sentido inverso. O sistema de válvulas garante o controle desejado e o sentido do fluxo, para dentro ou para fora dos cilindros[2, 3].

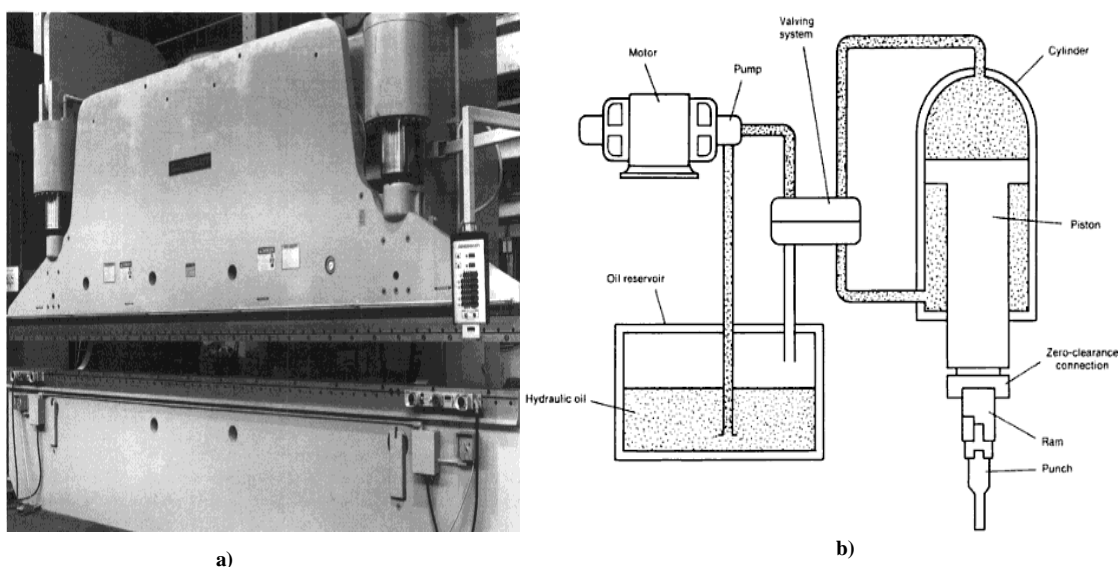


Figura 2.6 a) Quinadora hidráulica[3], b) detalhe do esquema de accionamento de uma quinadora hidráulica[2].

Ao contrário da quinadora mecânica, neste tipo de quinadoras não existe nenhuma forma de ligação mecânica que traduza o movimento de rotação em movimentos alternativos rectilíneos. A acção de rotação produzida pelo motor numa quinadora hidráulica é utilizada pelo sistema de bombagem que garante a circulação em todo o sistema, de um fluxo controlado a pressão constante, que por sua vez permite que a força de quinagem seja a mesma em todos os pontos do seu percurso descendente. Logo, o avental móvel pode ser interrompido em qualquer ponto do seu curso, por acção de um dispositivo mecânico, como por exemplo um pedal.

A força de quinagem, neste tipo de equipamentos é aumentada segundo um aumento da pressão hidráulica. Estas possuem uma capacidade de quinagem que supera de longe a capacidade das quinadoras mecânicas, e devido ao seu longo curso e potência, é possível dobrar chapas de maior espessura. A principal limitação destas quinadoras, no que refere à capacidade de quinagem, reside no comprimento das peças a serem dobradas, exigindo maior capacidade quanto maior for o comprimento.

2.3. Classificação dos processos de quinagem

Os processos de produção por quinagem encontram-se, segundo a norma DIN 8586 (Figura 2.7), divididos em dois grupos nomeadamente: quinagem utilizando matrizes lineares, ou seja, matrizes que permitem o processo de dobragem ao longo de um eixo linear; quinagem utilizando matrizes com movimentos rotacionais.

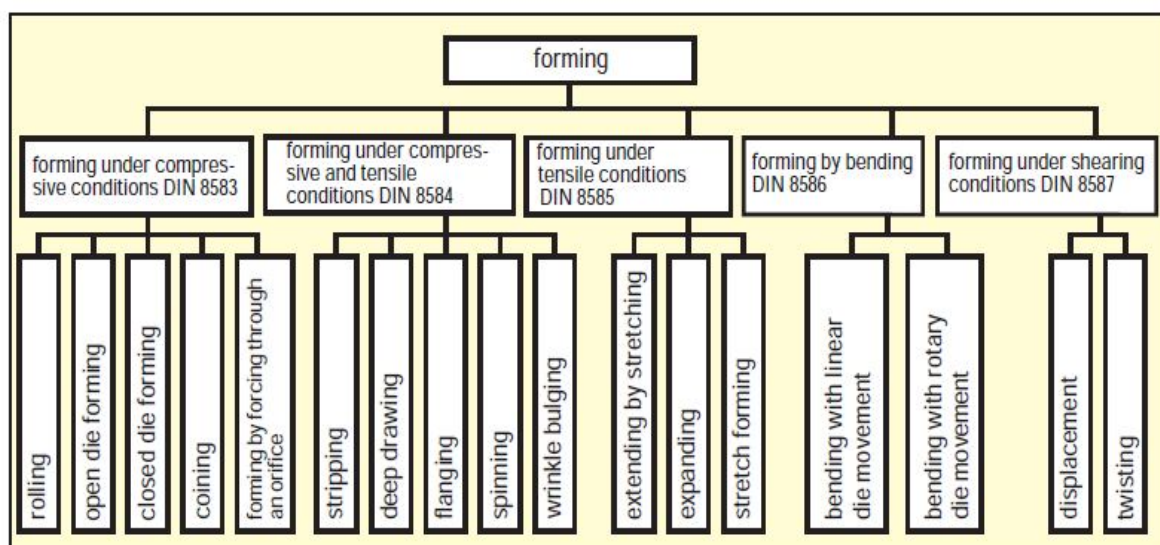


Figura 2.7 Classificação dos processos de conformação segundo a norma DIN 8582[4].

2.3.1. Quinagem ao longo de um eixo linear

Na quinagem ao longo de um eixo linear, a operação pode ser realizada de diversas formas, em que o formato das peças é influenciado essencialmente pela geometria das ferramentas e pelo modo como a chapa é solicitada entre o punção e a matriz. Contudo, é habitual considerar os seguintes tipos de quinagem:

- Quinagem no ar (air bending)
- Quinagem em V (V Bending)
- Quinagem a fundo (Bottoming)
- Quinagem em U (U die Bending)
- Quinagem Rotativa
- Quinagem de Flange com Punção de Arraste (Wiping Die Bending)

Quinagem no ar (air bending)

No processo de quinagem no ar, o valor do ângulo é determinado pela penetração do punção na matriz (profundidade de quinagem), sendo possível obter diferentes ângulos de quinagem sem necessidade de substituir qualquer ferramenta (Figura 2.8). As forças envolvidas neste caso são reduzidas quando comparada com os outros tipos de quinagem, contudo a precisão dimensional é limitada, devido à recuperação elástica que o material sofre após deformação plástica alterando consequentemente a geometria final da peça. Assim, pode-se referir desde já que o processo de quinagem no ar apresenta as seguintes vantagens relativamente aos outros processos: pode ser efectuada em máquinas ferramenta de menor capacidade (uma vez que a força e energia necessárias para quinagem são mais reduzidas), menor desgaste das ferramentas e o mesmo conjunto punção/matriz pode ser usado para executar operações de quinagem com ângulos diferentes, permitindo uma redução dos custos inerentes à preparação e montagem das ferramentas[1, 5, 6].

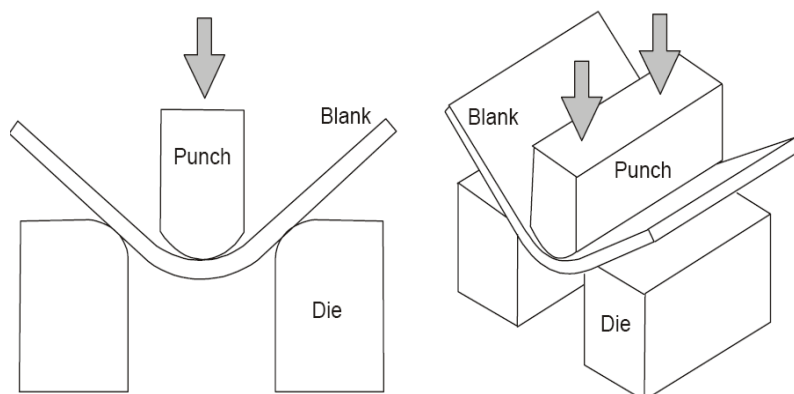


Figura 2.8 Quinagem no ar (air bending).

Quinagem em V (V bending)

Na quinagem em V, a chapa é deformada até encostar às ferramentas, sendo a folga entre cunho e matriz igual à espessura da chapa (Figura 2.9). Esta operação é mais precisa que a quinagem no ar e é geralmente utilizada para quinar chapas com ângulos de 90° ou ligeiramente inferiores, com espessuras que podem variar entre os 0.5 e os 25 mm [1, 6].

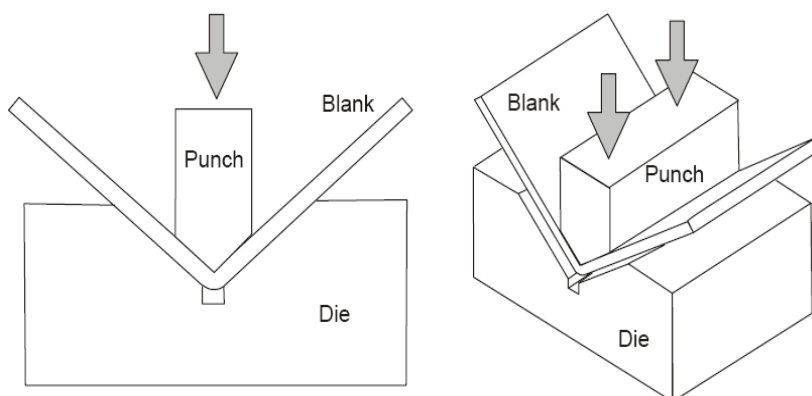


Figura 2.9 Quinagem em V (Vbending).

Quinagem a fundo (bottom bending)

Na quinagem a fundo, muitas vezes designada de quinagem com "quebra do nervo", a chapa é esmagada entre o punção e a matriz, contribuindo assim para a reduzir ou até mesmo eliminar a recuperação elástica do material (Figura 2.10). Este processo é geralmente utilizado para chapas de espessuras reduzidas (inferior a 3 mm). A força necessária para quinagem utilizada por esta técnica é consideravelmente superior a requerida para a quinagem no ar (cerca de três a cinco vezes maior) [1, 6].

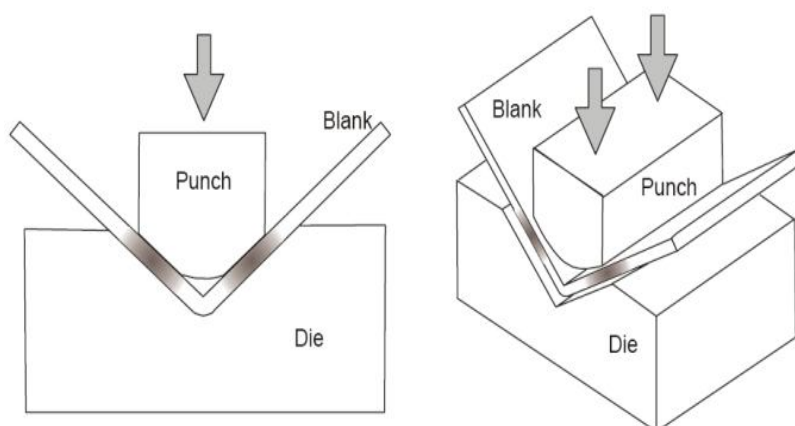


Figura 2.10 Quinagem a fundo (bottoming).

Quinagem em U (U die bending)

Esta técnica é caracterizada pela existência de dois eixos de dobragem paralelos. Normalmente utiliza-se um encostador que promove o contacto com a chapa na zona do fundo do punção, evitando defeitos de forma na peça enformada (Figura 2.11). Contudo, o dispositivo requer um acréscimo de força de quinagem na ordem dos 30 a 40% [1, 5, 6].

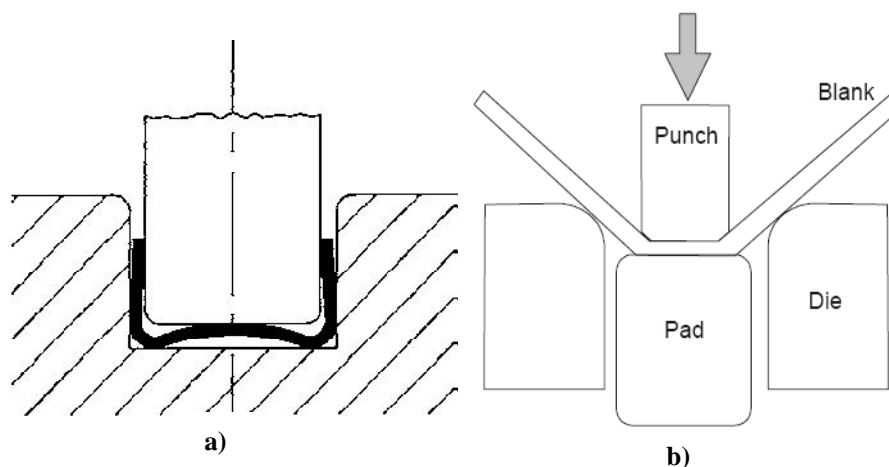


Figura 2.11 a) Quinagem em U: a) sem encostador, b) com encostador.

Quinagem rotativa

No processo de quinagem rotativa, utiliza-se uma matriz rotativa para enformar a chapa (Figura 2.12). Este processo apresenta algumas vantagens tais como: não há necessidade de utilizar um encostador para a chapa, o efeito de mola (recuperação elástica ou *springback*) pode ser compensada diminuindo o ângulo de dobragem e as forças requeridas pelo processo são baixas relativamente a alguns processos (cerca de 50 a 80%

inferior a força requerida para o processo de quinagem em flange com punção de arraste)[1, 5, 6].

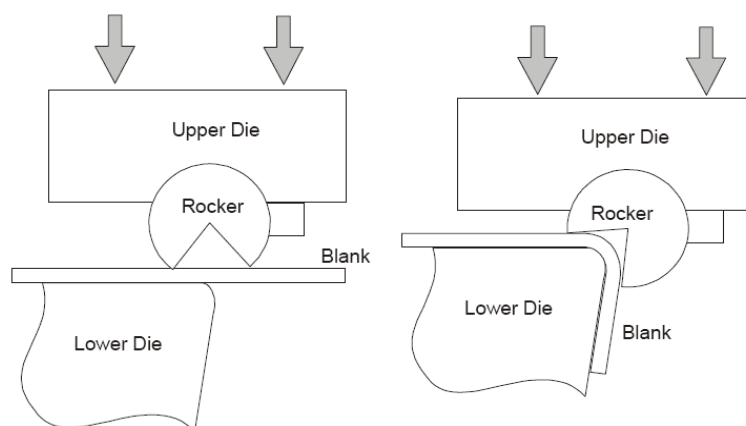


Figura 2.12 Quinagem rotativa.

Quinagem em flange com punção de arraste (wiping die bending)

Neste processo uma das abas da chapa é fixada por um encostador, enquanto a outra é dobrada a 90° pela acção da descida do punção (Figura 2.13). Este processo tem a vantagem de permitir alterar com facilidade as dimensões da aba enformada e a do ângulo de dobra, através da variação do curso máximo do punção[1, 5, 6].

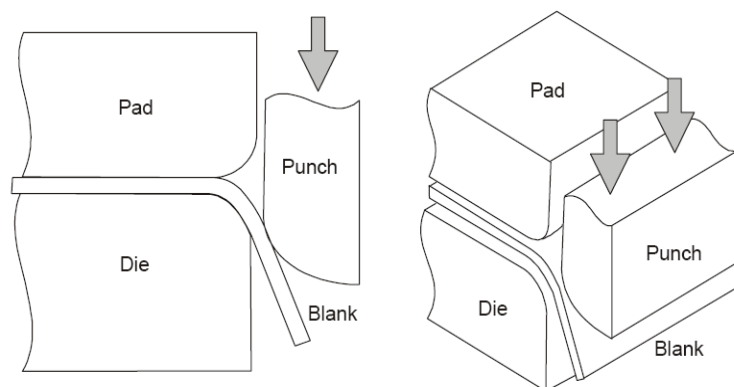


Figura 2.13 Quinagem de Flange com punção de arraste (wiping die bending).

2.4. Considerações essenciais do desenho estrutural de quinadoras

A estrutura base de uma quinadora é feita de modo a que se mantenha rígida durante o seu funcionamento. O projecto destas máquinas é de elevada importância e realizado de modo a que estas proporcionem ângulos de dobra das chapas quinadas com precisão.

A quinagem de chapa é um método expedito para dobrar chapa ao longo de uma determinada linha. Essencialmente, o processo tecnológico desenvolve-se por aplicação de força sobre uma ferramenta (o punção) que força a chapa a dobrar-se na cavidade maquinada numa matriz (a ferramenta de quinagem). Normalmente a matriz tem múltiplas cavidades com geometria adequada ao desenho corrente para obtenção de perfis metálicos a obter por este modo de conformação plástica de chapa. Na figura 2.14 esquematiza-se as ferramentas envolvidas na quinagem de chapa metálica

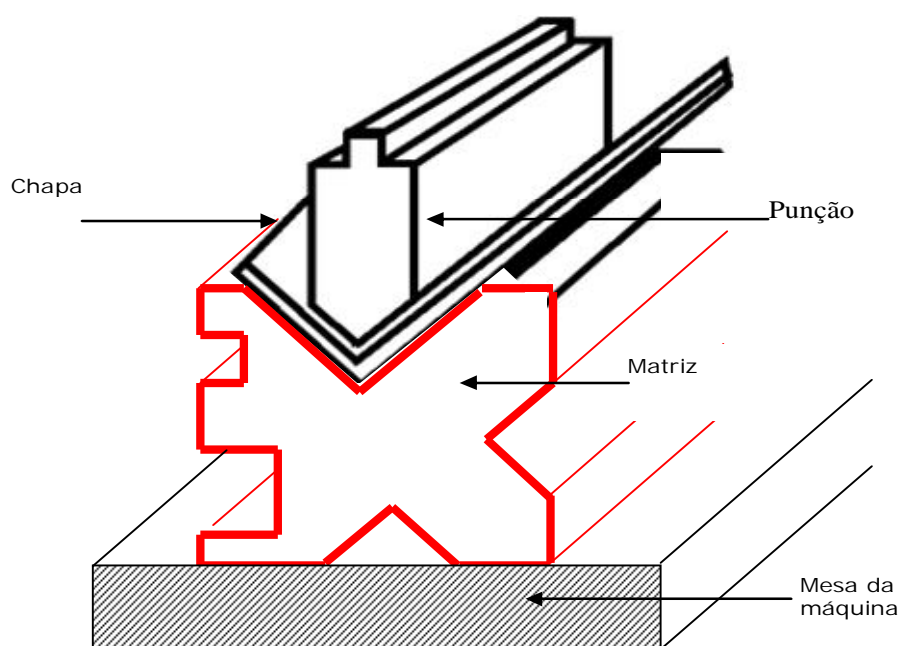


Figura 2.14 Esquema do modo operativo de quinagem de chapa.

Estas máquinas possuem tipicamente uma estrutura em C, que consiste basicamente em quatro placas de aço e uma travessa horizontal (Figura 2.15). Dois montantes são ligados pelo topo através de uma travessa horizontal e na parte inferior de uma viga caixão (base).

Este processo de conformação utiliza para o fabrico um punção e uma matriz de geometria variável adaptáveis a uma larga variedade de formas e dimensões. Os punções e as matrizes são fixados a dois órgãos resistentes, que se designam habitualmente por aventais, em que um destes é fixo, enquanto o outro é móvel, conforme o tipo de sistema que acciona este último. O avental móvel é uma placa que desliza para cima e para baixo sobre guias, com auxílio de duas fontes de energia (cilindros no caso de uma quinadora

hidráulica) montados acima das extremidades superiores do avental, possibilitando assim a realização do trabalho.

A capacidade das quinadoras varia geralmente na gama compreendida entre 20 e 600 Toneladas. As figuras 2.15, 2.16, 2.17 e 2.18 ilustram as soluções construtivas mais comuns relacionadas com esta cinemática.

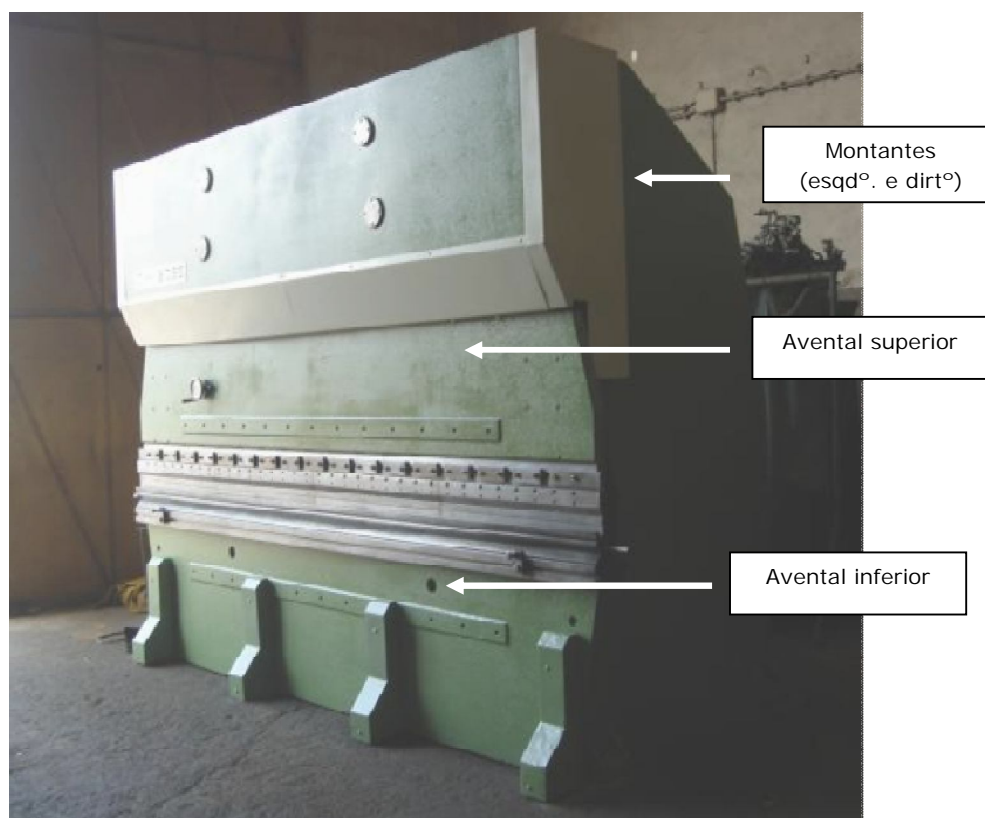


Figura 2.15 Quinadora ADIRA S.A. (Portugal) com avental superior móvel (downstroking press brake).

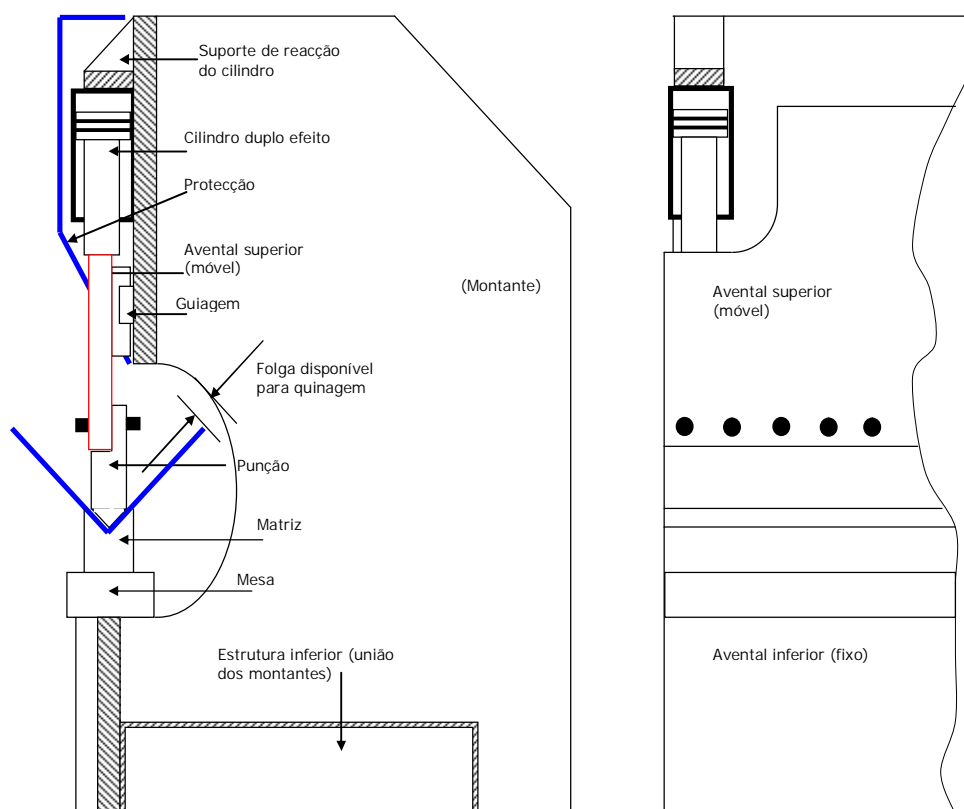


Figura 2.16 Ilustração e identificação dos elementos constituintes de uma quinadora.

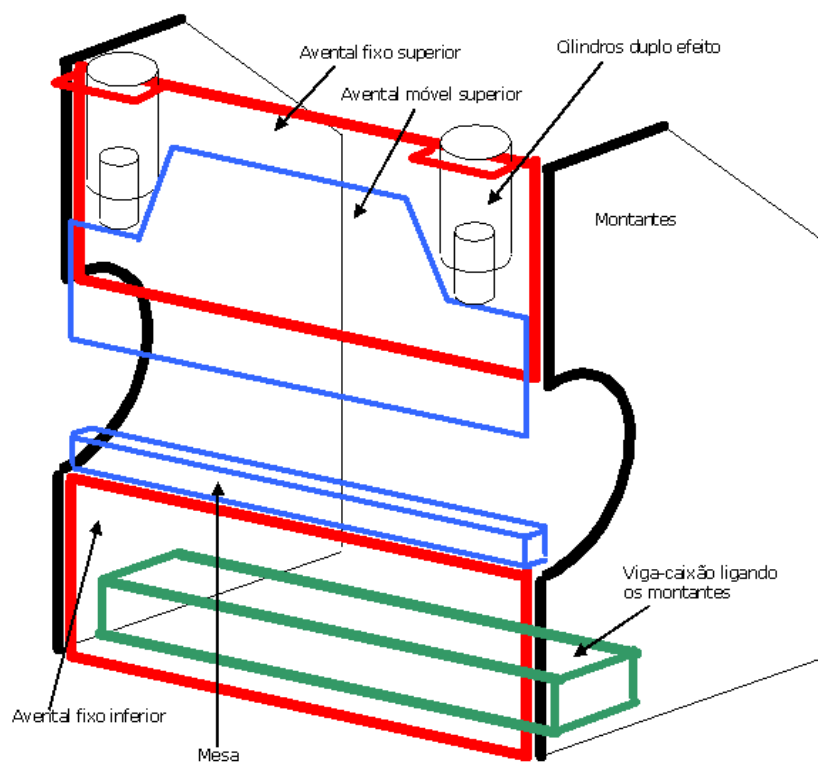


Figura 2.17 Esquema dos módulos integrando a estrutura resistente de uma quinadora de avental superior móvel (downstroking press brake).

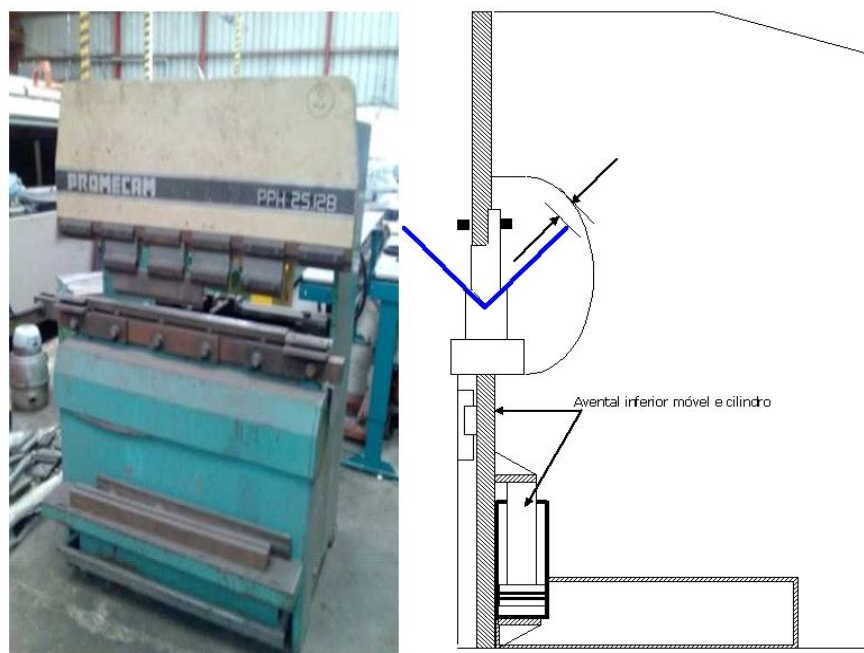


Figura 2.18 Quinadora PROMECAM (França) com avental inferior móvel (upstroking press-brake). Esta solução é usada em máquinas de pequena capacidade.

Como se pode verificar, a estrutura desta máquina é de grande simplicidade, procurando-se que os componentes como o montante e aventais resistam apenas a esforços no seu plano (esforços de membrana). Os módulos indicados nas figuras 2.16 e 2.17 são normalmente soldados cuidadosamente, sendo depois o conjunto submetido a um tratamento térmico de relaxação de tensões residuais. Como parâmetro de controlo de projecto, é usual prescrever um afastamento relativo entre o avental superior e inferior (segundo ANSI B5.52M – 1980) dado pela expressão empírica:

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}}}{100} [\text{mm}] \quad (2.1)$$

Onde $F_{\text{máx}}$ é a máxima força de quinagem (em Toneladas.) disponível na máquina. Por exemplo, se a quinadora puder atingir 100Ton, o afastamento tolerado é de 1mm. Para prensas, há uma restrição mais severa, sendo o deslocamento tolerado dado por:

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}}}{1000} [\text{mm}] \quad (2.2)$$

Uma quinadora é normalmente usada para efectuar dobragem de chapa segundo o modo indicado. Fica evidenciado que a realização de um perfil com múltiplos cantos precisa pois de várias operações, as quais se devem efectuar de acordo com uma sequência

correcta a fim de evitar a interferência da chapa com o avental móvel da máquina (diz-se que se obteve contra-saída) tal como mostra a figura 2.19.

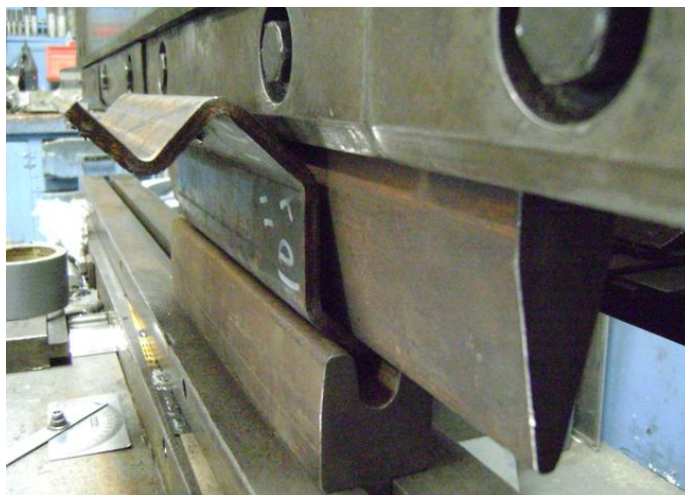


Figura 2.19 Exemplo de quinagem múltipla: uma boa escolha da sequência permite retirar o perfil sem problemas; a sequência errada pode bloqueá-lo no avental e punção.

O projecto da estrutura de uma quinadora não é uma tarefa trabalhosa, quanto ao uso de ferramentas de cálculo da deformação que se gera; não se pretende dizer que é acessível pela simplicidade de fórmulas a usar; apenas se evidencia que se trata de obter um valor máximo para a deformação em pontos críticos da máquina pelo efeito que provocam no bom desempenho cinemático e também pelo facto do estudo se vincular a um problema linear elástico, de modo a que a estrutura da quinadora não entre em regime plástico.

Quando se mencionou que há lugar a observar um valor máximo para a deformação da máquina, trata-se de um critério simples que funciona bem do lado da segurança do projecto, pelo facto de se garantir uma rigidez global do conjunto adequada ao tipo de forças que deva suportar. Essencialmente, e de modo simplificado, o cálculo da estrutura de uma quinadora é efectuada sem recurso a modelação por elementos finitos, considerando que a força máxima tende a deformar a estrutura num modo de abertura (“opening mode”).

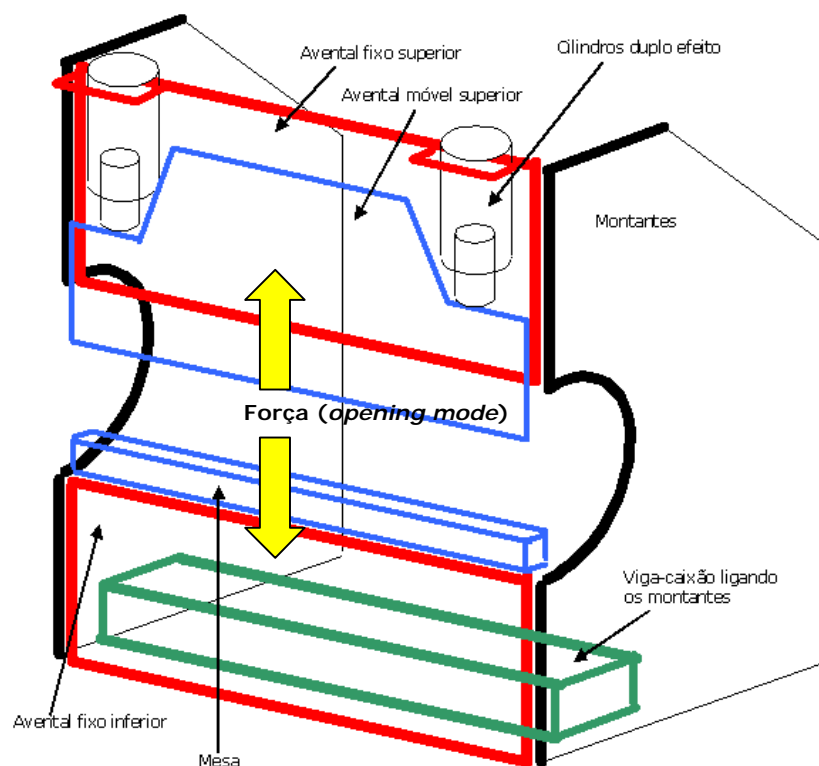


Figura 2.20 Solicitação principal a considerar para o projecto da estrutura resistente de quinadoras.

3. Conceitos teóricos

3.1. Teoria da flexão no domínio plástico

A deformação plástica por flexão é um tipo de deformação habitual num grande número de processos tecnológicos utilizados industrialmente, como é o caso da quinagem de chapa. É importante conhecer alguns fundamentos teóricos da flexão em domínio plástico aplicados à dobragem (quinagem) de peças com pequena curvatura (designadas habitualmente por peças direitas) e de peças curvas de eixo recto. O conhecimento destes conceitos é indispensável, uma vez que existem processos tecnológicos onde são obtidos raios de curvatura claramente superiores à espessura da chapa, o que permite considerar que as tensões desenvolvidas segundo a espessura da chapa sejam praticamente nulas, sendo por isso habitual considerar que a curvatura é desprezável[7].

A metodologia utilizada em ambas as análises terá por base o método da fatia elementar, sujeito às seguintes hipóteses:

- a) O material é homogéneo e isotrópico;
- b) O material tem um comportamento mecânico do tipo elástico – perfeitamente plástico, com uma tensão limite de elasticidade (σ_e) igual quer em tracção quer em compressão;
- c) As secções inicialmente planas permanecem planas durante e após a deformação, convergindo para o centro da curva;
- d) Os princípios de Saint-Venant e da sobreposição são aplicáveis.

3.2. Fibra neutra/linha neutra

A fibra neutra é a linha cujo comprimento não varia após a deformação da peça ($\epsilon_\theta = 0$) e cuja posição depende fundamentalmente da espessura da chapa e do tipo de solicitação introduzida pelas ferramentas.

A figura 3.1 representa a secção transversal de uma peça antes e após ter sido solicitada por acção de um momento flector e uma força axial F.

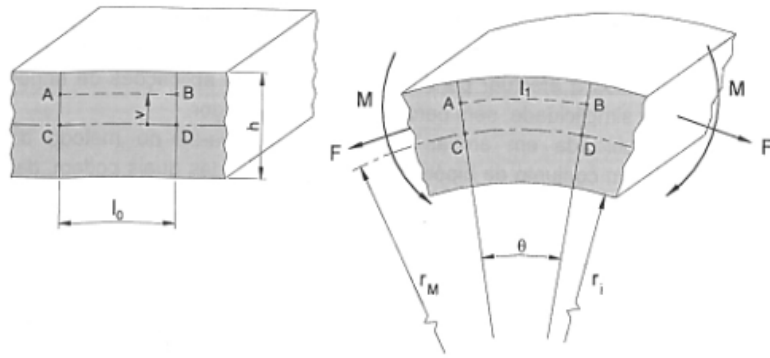


Figura 3.1 Deformação longitudinal das fibras AB e CD de uma peça solicitada a flexão por um momento M e por uma força axial F[7].

Os comprimentos da fibra AB antes e após solicitação dos esforços de conformação são dados pelas equações (3.1) e (3.2) respectivamente[7]:

$$l_0 = AB \quad (3.1)$$

$$l_1 = (r_M + v)\theta \quad (3.2)$$

O comprimento da linha média no estado deformado é dado por[7],

$$l_M = r_M \theta \quad (3.3)$$

e a extensão tangencial da fibra AB será dada pela seguinte expressão[7]:

$$(\varepsilon_\theta)_{AB} = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \left[\frac{l_M}{l_0} \left(1 + \frac{v}{r_M} \right) \right] = \ln \left(\frac{l_M}{l_0} \right) + \ln \left(1 + \frac{v}{r_M} \right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (3.4)$$

Onde: ε_a e ε_b correspondem as extensões tangencial da linha média e extensão de flexão respectivamente.

Em processos em que o raio de curvatura é muito grande comparado com a espessura da chapa, a extensão de flexão é praticamente nula, podendo se efectuar o estudo de maneira mais simplificada desprezando a curvatura, sendo por isso denominado por flexão de peças direitas. Contudo a extensão de flexão é dada por[7]:

$$\varepsilon_b = \ln \left(1 + \frac{v}{r_M} \right) \approx \frac{v}{r_M} \quad (3.5)$$

A distribuição de extensões é aproximadamente linear, como ilustrado na figura que se segue:

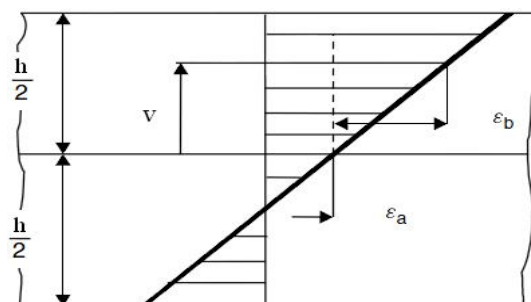


Figura 3.2 Distribuição de extensões consideradas na flexão[8].

3.3. Flexão de peças direitas

3.3.1. Distribuição de tensões

Neste capítulo será conhecida a distribuição de tensões de peças direitas quando solicitadas segundo a aplicação de um momento puro.

Considere-se uma peça de largura b e espessura h , solicitada por um momento flector puro (M_z) como ilustra a figura 3.3. Tendo em conta que se trata de uma peça direita, além das simplificações apresentadas inicialmente, as tensões segundo y são desprezáveis ($\sigma_y = 0$) e a linha neutra é coincidente com a linha média.

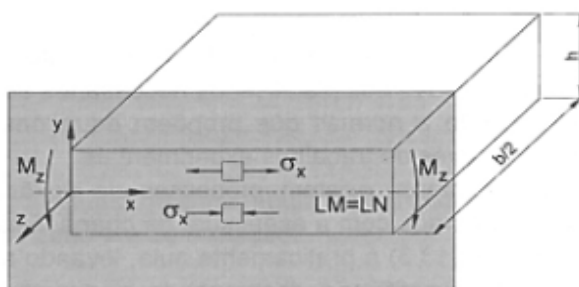


Figura 3.3 Distribuição de tensões para flexão de pura de uma peça direita.

A distribuição de tensões segundo a direcção x (σ_x) depende da intensidade do momento flector (M_z) aplicado, sendo possível encontrar os seguintes tipos de solicitação:

- **Solicitação elástica**

Para este tipo de solicitação, a distribuição de tensões segundo x (σ_x) é obtida a partir da equação de flexão elástica[7],

$$\sigma_x = \pm \frac{M_z y}{I_z} \quad (3.6)$$

onde: M_z = o momento flector,

y = distancia da fibra em análise à linha neutra,
 I_z = momento de inércia relativamente à fibra neutra,
 \pm = devido ao facto das tensões σ_x serem de tracção e de compressão, no lado exterior e interior da peça, respectivamente.

O momento máximo (M_e), que a chapa suporta no domínio elástico, considerando que as fibras exteriores estão na eminência de entrar no domínio plástico, poderá ser determinado através da equação (3.6). A título de exemplo, para o caso particular de uma secção transversal rectangular como a representada na figura 3.3, para a qual o momento de inércia é dado por $I_z = \frac{bh^3}{12}$, a tensão atinge o limite elástico ($\sigma_x = \sigma_e$) na fibra exterior $y = \frac{h}{2}$. Nestas condições, o momento elástico máximo é obtido pela seguinte equação[7]:

$$M_e = \sigma_e \frac{bh^2}{6} \quad (3.7)$$

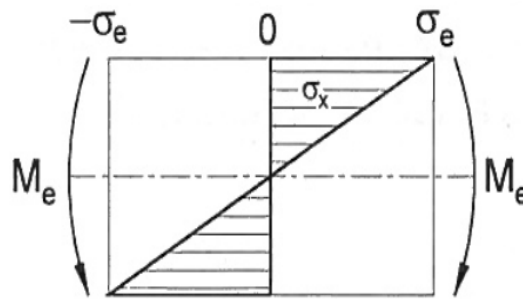


Figura 3.4 Distribuição de tensões para a flexão pura de uma peça direita para uma solicitação com um momento elástico.

Quando relação entre a largura e a espessura da chapa for suficientemente elevada, pode-se admitir que as secções com $z = C^{te}$, normais ao momento e suficientemente afastadas dos extremos da chapa, encontram-se em condições de deformação plana, ou seja, $\varepsilon_z = 0$. Nesta condição, a tensão σ_z vem dada pela seguinte equação[7]:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu\sigma_z] = 0 \Rightarrow \sigma_z = \nu^{-1}\sigma_x \quad (3.8)$$

em que E é o módulo de elasticidade do material e ν é o coeficiente de poisson.

Nos casos em que a largura (b) for muito inferior ao comprimento da chapa, de somente algumas vezes a espessura da chapa (h), pode admitir-se que a deformação se processa em condições de tensão plana ($\sigma_z = 0$), havendo a necessidade de se considerar as deformações segundo x e z .

• Solicitação elasto-plástica

Com o aumento do momento para além do limite elástico (M_e), verifica-se que a tensão limite de elasticidade (σ_e) é atingida pelas fibras exteriores, aumentando progressivamente a zona de deformação plástica em direcção ao núcleo, o qual vai permanecendo em domínio elástico.

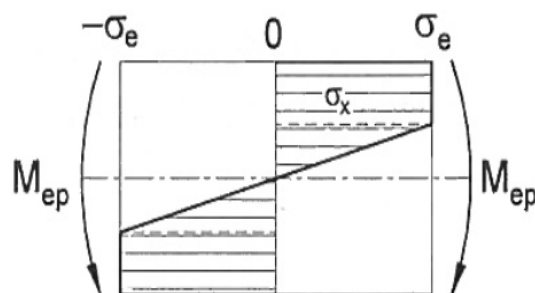


Figura 3.5 Distribuição de tensões para a flexão pura de uma peça direita para uma solicitação com um momento elasto-plástico[7].

Perante este tipo de solicitação (Figura 3.5), o momento flector elasto-plástico (M_{ep}), pode ser determinado por via do equilíbrio entre o momento exterior aplicado e o momento que resulta das tensões internas, em que estão em jogo as forças médias elástica e plástica, F_e e F_p , que por sua vez correspondem respectivamente, às tensões elásticas actuantes numa parte da espessura (d_e) e às tensões plásticas que actuam na parcela (d_p).

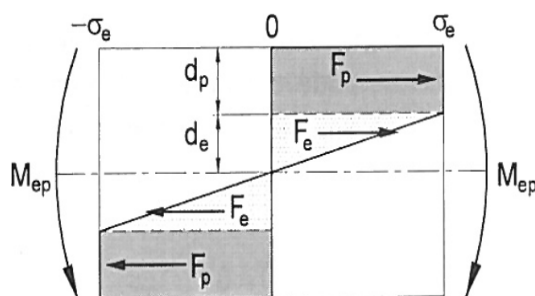


Figura 3.6 Forças médias resultantes da distribuição de tensões[7]

Do equilíbrio, resulta a equação (3.9) que dá o valor do momento elasto-plástico em função da parcela de espessura que se encontra no domínio plástico (d_p). Todavia, o momento também pode ser obtido, segundo a parcela de espessura que se encontra no domínio elástico ($d_e = \frac{h}{2} - d_p$).

Portanto, os momentos flectores correspondentes a zona elástica e plástica são quantificados pela primeira e segunda parcela do segundo membro da equação (3.9) respectivamente[7].

$$M_{ep} = F_e \frac{4}{3} d_e + F_p (h - d_p) = \frac{\sigma_e b (h - 2d_p)^2}{6} + \sigma_e b d_p (h - d_p) \quad (3.9)$$

- **Solicitação plástica**

Caso o momento continue a aumentar, a zona das fibras em domínio plástico vai aumentar, tendo como consequência uma diminuição da zona em domínio elástico. a distribuição de tensões resultante do momento plástico (M_p) é constante em toda a secção transversal (Figura 3.7) e igual à tensão limite de elasticidade (σ_e), podendo ser determinado a partir da equação (3.9), em que $d_p = \frac{h}{2}$, resultando a seguinte equação:

$$M_p = \frac{\sigma_e b h^2}{4} \quad (3.10)$$

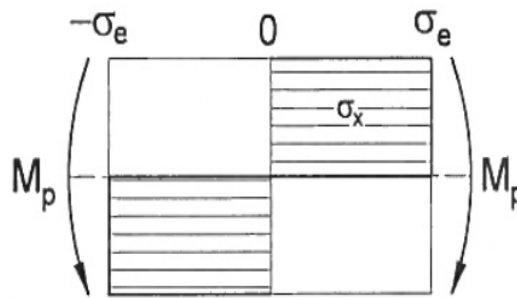


Figura 3.7 Distribuição de tensões para a flexão pura de uma peça direita para uma solicitação com um momento elasto-plástico[7].

O momento plástico (M_p) é o maior momento que se pode aplicar à chapa assumindo um modelo elasto-plástico para o material. Teoricamente seria o mesmo que dizer que a chapa iria funcionar como uma rótula plástica até a rotura, o que é normalmente designado por colapso plástico.

3.3.2. Deformações

Adoptado o modelo elástico-perfeitamente plástico, surgem dois regimes de deformação possíveis em função da tensão aplicada[7]:

- **Regime elástico**

$$\sigma = E\varepsilon; \text{ em que } 0 \leq \varepsilon < \frac{\sigma_e}{E} \quad (3.11)$$

- **Regime plástico**

$$\sigma = \sigma_e; \text{ em que } \varepsilon \geq \frac{\sigma_e}{E} \quad (3.12)$$

onde: E = módulo de elasticidade do material.

A relação entre o momento flector aplicado e a curvatura da peça pode ser obtida recorrendo a equação (3.4), que para o caso de peças direitas pode ser escrita da seguinte maneira[7]:

$$\varepsilon_x = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \cong \frac{y}{\rho} \quad (3.13)$$

onde: ρ = raio de curvatura da secção das fibras na zona elástica. Assim, a curvatura ($\frac{1}{\rho}$), é definida pela seguinte equação[7]:

$$\frac{\sigma_e}{E} = \frac{\frac{h}{2} - d_p}{\rho} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_e}{E \left(\frac{h}{2} - d_p \right)} \quad (3.14)$$

onde:

h = espessura da chapa,

d_p = parcela de espessura que se encontra no domínio plástico.

A evolução da curvatura com o momento aplicado, encontra-se representada na figura 3.8, identificando-se sobre a curva quatro tipos de carregamentos diferentes, representados de 1 à 4.

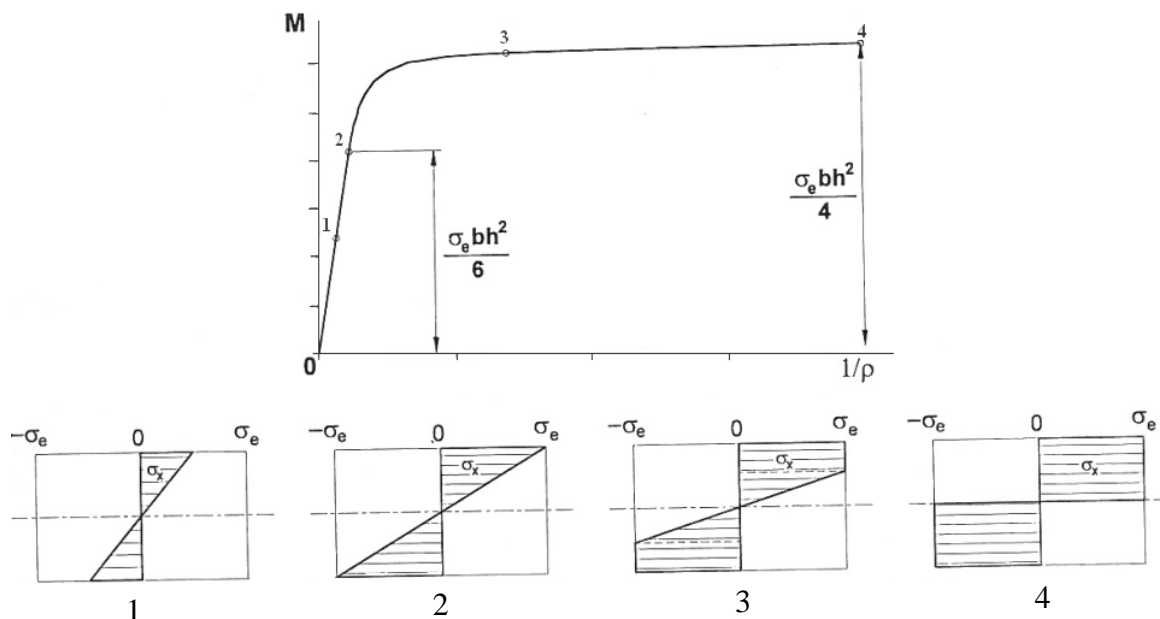


Figura 3.8 Evolução da curvatura com o momento aplicado[7].

Analisando a figura 3.8, verifica-se que a curvatura varia linearmente com o momento até atingir o limite elástico (M_e), sendo a curvatura dada pela equação (3.15). Depois de se atingir o valor elástico, a variação da curvatura com o momento flector deixa de ser linear até o momento que todas as fibras atingirem o domínio plástico (M_p , para $d_p = \frac{h}{2}$), sendo a curvatura dada pela equação (3.16), para o caso em que o momento é máximo (M_p)[7].

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_z} \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{\rho} = \infty \quad (3.16)$$

O conceito apresentado no parágrafo anterior retrata o colapso plástico apresentado anteriormente e que na prática dificilmente ocorrerá, uma vez que a deformação plástica será sempre acompanhada pelo encruamento do material[7].

Para os diferentes tipos de solicitações apresentadas na figura 3.8 (1 à 4), torna-se interessante estimar o valor da relação entre o raio de curvatura e a espessura da chapa $\left(\frac{\rho}{h}\right)$, que estabelece a transição entre as diferentes solicitações aplicadas. Admitindo que o quociente entre o módulo de elasticidade e a tensão limite de elasticidade $\left(\frac{E}{\sigma_e} \approx 1000\right)$, da equação (3.14), obtém-se que a condição limite de entrada em deformação plástica (solicitação 2), aparecerá quando[7],

$$\frac{\rho}{h} \cong 500 \quad (3.16)$$

Por outro lado, será normal admitir que a condição a partir da qual toda chapa se encontra em domínio plástico, representada pela solicitação 4 da figura 3.8[7],

$$\frac{\rho}{h} \cong 100 \quad (3.17)$$

Também, é importante analisar a influência dos carregamentos relativamente à variação da espessura da chapa durante a deformação. Na figura 3-9 representa-se a rotação das secções com a aplicação de um momento plástico puro, assim como duas fibras simétricas em relação a linha neutra com o comprimento inicial l e considerando uma espessura infinitesimal Δy . Como resultado, as fibras situadas acima da linha neutra irão alongar segundo x e encurtar segundo y , $dl = yd\alpha > 0$ e $d(\Delta y) < 0$, respectivamente. De

notar que as variações ocorridas no lado onde a chapa se encontra em compressão, sofrerá variações de sinal contrário ($dl = -y d\alpha < 0$ e $d(\Delta y) > 0$), com igual valor absoluto. Integrando as reduções de espessura na zona de tração e de compressão, obtém-se o valor total de redução e aumento, respectivamente, da espessura que a chapa sofre durante a deformação. Como esses valores são iguais em valor absoluto, conclui-se que a chapa não sofre variação de espessura durante a deformação sofrida através da solicitação com um momento puro[7].

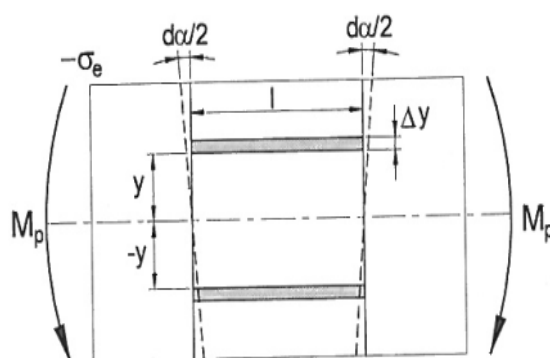


Figura 3.9 Rotação das secções mediante a aplicação de um momento puro[7].

3.3.3. Recuperação elástica (efeito de mola ou *springback*)

O fenómeno da recuperação elástica também designado por efeito de mola ou *springback*, é definido como a deformação adicional de um componente estrutural, após a retirada da solicitação (carga) que originou a flexão[7, 9]. Quando a carga é removida, o material tende a voltar à sua forma inicial. Todavia, muitas vezes, dependendo do tipo de carregamento efectuado, o mesmo é impedido de regressar à sua forma inicial devido a deformações plásticas sofridas durante essa solicitação. Entretanto, devido à relaxação das tensões elásticas no material, pode ocorrer um certo grau de recuperação elástica do material decorrente da ductilidade do material[10].

Como consequência do fenómeno de recuperação elástica, ocorre uma alteração de alguns parâmetros geométricos da peça dobrada, entre os quais o raio de dobra e o respectivo ângulo, como se pode verificar através da figura 3.10.

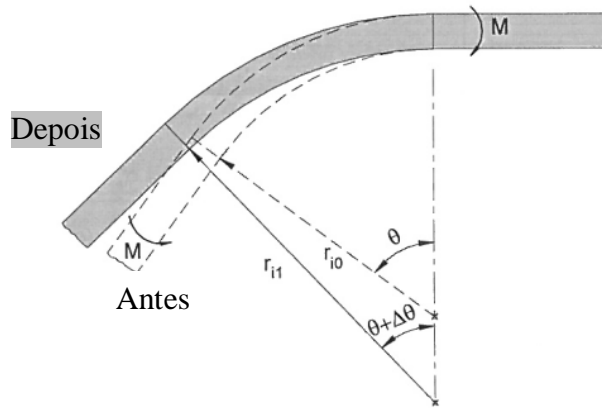


Figura 3.10 Recuperação elástica (efeito de mola ou *springback*)[7].

Os processos tecnológicos que envolvem flexão, como por exemplo a quinagem de chapa, enfrentam algumas dificuldades no controlo deste fenómeno, que como já foi referido, aparece quando as solicitações como as representadas nas figuras 3.4, 3.5, 3.7 são retiradas.

Pela figura 3.11 podemos verificar que a variação de curvatura/recuperação elástica ($\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)$) depende da solicitação e pode ser quantificada a partir da equação (3.14) por[7]:

$$\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{2\Delta\sigma_{\text{ext}}}{Eh} \quad (3.18)$$

onde: $\Delta\sigma_{\text{ext}}$ = variação de tensão que a fibra exterior sofre entre o final da solicitação e a posição de equilíbrio final.

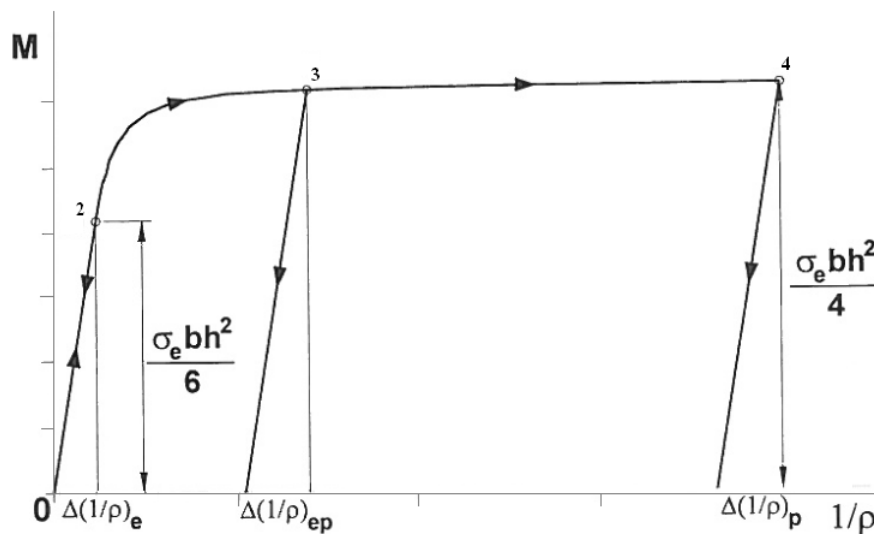


Figura 3.11 Variação da curvatura durante a retirada da solicitação em função do carregamento aplicado durante a flexão[7].

3.3.4. Ângulo de recuperação elástica

Muitas vezes torna-se necessário efectuar uma estimativa a variação angular que a peça sofre durante a ocorrência do fenómeno da recuperação elástica, para que o projecto das ferramentas envolvidas no processo de fabrico possam ser corrigidas, ou ainda, para que durante a flexão da peça, parâmetros inerentes ao processo possam ser ajustados para compensar esta variação angular.

Na figura 3.12 ilustra-se a rotação ($\frac{\Delta\alpha}{2}$) sofrida pelas secções durante o fenómeno da recuperação elástica.

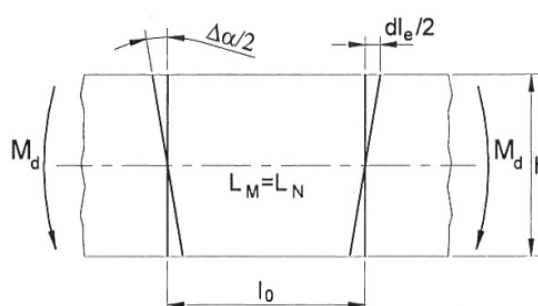


Figura 3.12 Rotação sofrida pelas secções durante a recuperação elástica.

Uma vez que na recuperação elástica a rotação das secções dá-se em torno da linha neutra/linha média, o ângulo de rotação da secção é dado pela seguinte expressão[7]:

$$\tan \frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{dl_e}{h} \quad (3.19)$$

onde: dl_e = comprimento recuperado pela fibra exterior; e h = espessura da chapa.

Uma vez que a recuperação dá-se no domínio elástico, onde são aplicadas as equações constitutivas linear elásticas, e considerando pequeno o ângulo de recuperação elástica, a equação (3.19) pode ser escrita da seguinte maneira[7]:

$$\frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{l_0(\epsilon_x)_{ext}}{h} \rightarrow \frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{2(\sigma_{xd})_{ext}}{hE} \quad (3.20)$$

onde:

l_0 = é o comprimento inicial da linha neutra,

$(\sigma_{xd})_{ext}$ = tensão de recuperação elástica na zona exterior da fibra,

E = módulo de elasticidade do material.

Verifica-se que a recuperação elástica é afectada pelo módulo de elasticidade, ou seja, um módulo de elasticidade mais baixo, origina uma maior recuperação elástica e

consequentemente uma maior dificuldade no controlo das dimensões finais da peça. O aumento das tensões de descarga e o trabalho a frio também originam um aumento do retorno elástico[1, 5].

4. Modelação Analítica

4.1. Projecto de peças utilizando quinagem em V no ar

4.1.1. Cálculo da dimensão da estampa plana

Para se determinar as dimensões da estampa plana é necessário conhecer-se o comprimento da linha que não variou o seu comprimento durante a deformação plástica (l_n), também conhecida como linha neutra (Figura 4.1). A posição da mesma depende das características mecânicas do material, da espessura da chapa bem como da geometria das ferramentas.

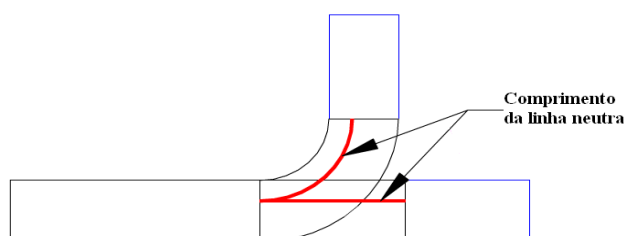


Figura 4.1 Representação da linha neutra no processo de dobragem.

Geralmente a determinação do comprimento do planificado faz-se recorrendo a normas, as quais resumem uma metodologia de cálculo que, na maioria dos casos, baseia-se em valores obtidos experimentalmente[1]. Assim sendo, a norma DIN 6935 é utilizada habitualmente pelos fabricantes de máquinas ferramentas e pelos projectistas. Esta norma destina-se ao cálculo de componentes dobrados a partir de planos em aço, geralmente para aplicações em engenharia.

O comprimento da estampa plana segundo a norma DIN 6935 é determinado por[1]:

$$l = a + b + \Delta l \quad (4.1)$$

onde:

a e b são os comprimentos das abas definidos de acordo com a figura 4.2 e Δl é um factor de compensação da linha neutra que pode ser positivo ou negativo dependendo do ângulo de abertura entre as duas abas (β), do raio interior de dobragem (r_i) e da espessura da chapa (h).

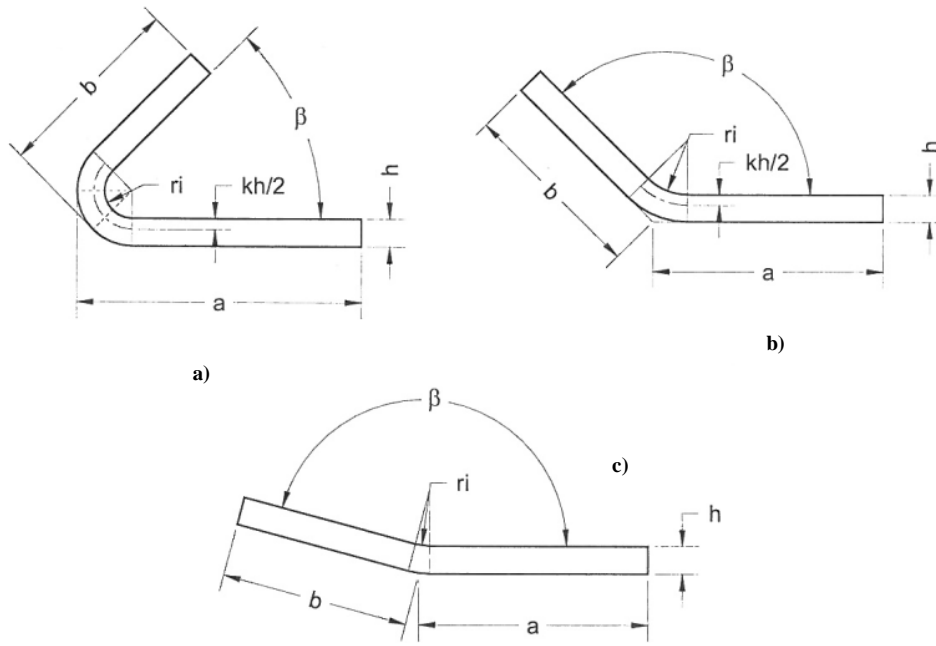


Figura 4.2 Cálculo da estampa plana para diferentes geometrias consideradas segundo a norma DIN 6935, para ângulo de abertura das abas (β) entre: a) 0 e 90°, b) 90 e 165° e c) 165 e 180°[1].

O factor de compensação (Δl) é determinado em função do ângulo de abertura das abas (β). De acordo com a figura 4.2, o factor de compensação é dado por[1]:

a) abertura das abas entre $0 \leq \beta \leq 90^\circ$

$$\Delta l = \pi \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \left(r_i + \frac{h}{2} k \right) - 2(r_i + h) \quad (4.2)$$

Em que r_i é o raio interior de dobragem, h a espessura da chapa e k o factor de correcção para a linha neutra descrito pela equação (4.5).

b) abertura das abas entre $90 \leq \beta \leq 165^\circ$

$$\Delta l = \pi \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \left(r_i + \frac{h}{2} k \right) - 2(r_i + h) \tan \frac{180 - \beta}{2} \quad (4.3)$$

Onde r_i o raio interior de dobragem, h a espessura da chapa e k o factor de correcção para a linha neutra descrito pela equação (4.5).

c) abertura das abas entre $165 \leq \beta \leq 180^\circ$

$$\Delta l = 0 \quad (4.4)$$

nestes casos o factor de correcção (k) é muito reduzido e a compensação por ele introduzida pode ser desprezada para a determinação da estampa plana.

O factor de correcção (k) utilizado no cálculo da estampa plana, define a variação que a linha neutra sofre relativamente a linha média, sendo expressa a partir da seguinte relação[1]:

$$k = 0.65 + \frac{1}{2} \log \frac{r_i}{h} \quad \text{se} \quad \frac{r_i}{h} \leq 5 \quad (4.5)$$

$$k = 1 \quad \text{se} \quad \frac{r_i}{h} > 5$$

Quando o valor deste factor for igual a $k=1$, a linha neutra coincide com a linha média.

Também é comum utilizar valores de $k = 0.3$ para dobragens apertadas se $\frac{r_i}{h} < 2$ e $k = 0.5$ para operações de dobragens comuns.

4.1.2. Raio mínimo de quinagem

Nas operações de quinagem, o raio do punção é uma das características do processo e é geralmente da mesma ordem de grandeza da espessura da chapa a conformar[1]. Segundo a norma DIN 6935, considera-se que a linha neutra coincide com a linha média (equação 4.5), apenas quando a relação entre o raio interior (r_i) e a espessura da chapa (h) superiores a 5. Todavia, sabe-se que a superfície da chapa que está em contacto com o punção encontra-se sujeita a tensões tangenciais de compressão (Figura 4.3).

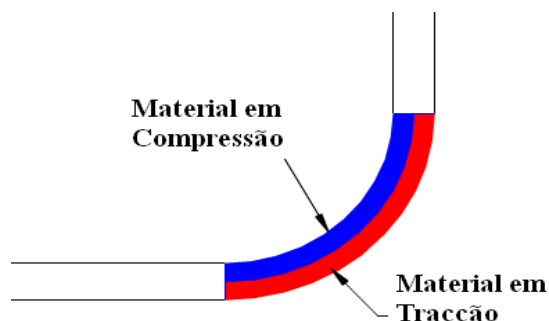


Figura 4.3 Representação do comportamento do material.

A utilização de punções com raios de quinagem muito pequenos origina valores muito elevados das extensões tangenciais nas fibras exteriores, o que pode conduzir ao aparecimento de fissuras ou ainda originar fractura[1, 11]. É usual definir um raio mínimo de quinagem (r_{\min}), para o qual aparecem fissuras na superfície exterior da chapa, vindo o seu valor normalmente expresso em função da espessura da chapa (h).

O raio do punção é um parâmetro de extrema importância e uma escolha adequada deste factor é relevante para o sucesso da operação de quinagem. Para se verificar o raio

que se deve usar na operação, determina-se usualmente o raio mínimo de quinagem através de um dos seguintes métodos:

- Baseando-se nas propriedades mecânicas do material, a ser estudado quando a matéria-prima for escassa;
- Natureza empírica.

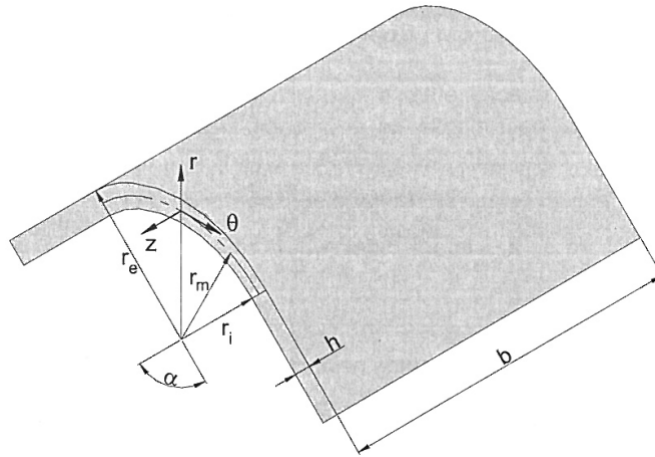


Figura 4.4 Principais variáveis do processo de quinagem de chapa[1].

De acordo a figura 4.4 consegue-se obter a extensão tangencial nominal (e_θ) para uma fibra, dada por[1]:

$$e_\theta = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(r_m + y)\alpha - l_0}{l_0} \quad (4.6)$$

onde:

y = distância da fibra à linha média

r_m = raio de curvatura

α = ângulo de dobra

l_0 = comprimento inicial da fibra

Sendo o valor do ângulo de dobra dado pela equação (4.7)[1],

$$\alpha = \frac{l_0}{r_m} \quad (4.7)$$

Substituindo este valor na equação (4.7), resulta que a extensão tangencial para a fibra exterior será dada através da seguinte equação[1]:

$$e_{\theta e} = \frac{h}{2r_m} = \frac{h}{2r_i + h} \quad (4.8)$$

Pode-se encontrar uma relação entre o raio mínimo de quinagem e o coeficiente de redução de área após fractura ($q = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$), considerando as seguintes hipóteses:

- i) O material é homogéneo e plástico;
- ii) Na flexão em domínio plástico a extensão verdadeira na fibra exterior para a qual a fractura ocorre é igual a extensão verdadeira da fractura no ensaio de tracção uniaxial;
- iii) O estado de tensão na flexão é plano (relação entre o comprimento de dobragem e a espessura da chapa, $\frac{b}{h}$, demasiado pequena).

A relação destas hipóteses com a extensão verdadeira do ensaio de tracção é a seguinte[1]:

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-q}\right). \quad (4.9)$$

A extensão verdadeira na fibra exterior é dada pela seguinte expressão[1]:

$$\varepsilon_{\theta e} = \ln(1 + e_{\theta e}) = \ln\left(1 + \frac{h}{2r_{\min} + h}\right) \quad (4.10)$$

Igualando a extensão verdadeira (ε_f) à extensão verdadeira na fibra exterior da flexão ($\varepsilon_{\theta e}$), obtém-se[1]:

$$\varepsilon_{\theta e} = \varepsilon_f \Rightarrow \ln\left(1 + \frac{h}{2r_{\min} + h}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-q}\right), \quad (4.11)$$

ou seja, existe uma relação entre o raio mínimo de quinagem (r_{\min}), a espessura da chapa (h) e a redução de espessura (q). Para valores de q após fractura inferiores a 0.2, considera-se que a linha média e a linha neutra coincidem e o raio mínimo de quinagem é dado pela seguinte equação[1, 10]:

$$\frac{r_{\min}}{h} = \frac{1}{2q} - 1 \quad \text{para } q < 0.2 \quad (4.12)$$

Quando q após fractura do material é superior a 0.2, não se pode continuar a admitir que na flexão a linha neutra coincide com a linha média, como anteriormente, sendo o raio mínimo de quinagem dado por[1, 10]:

$$\frac{r_{\min}}{h} = \frac{(1-q)^2}{2q - q^2} \quad \text{para } q < 0.2 \quad (4.13)$$

Existem, porém, métodos para determinar o raio mínimo de quinagem para alguns dos materiais mais utilizados em construção metálica. A relação que se segue é um exemplo[1]:

$$r_{\min} = Ch \quad (4.14)$$

em que C = coeficiente dado pela tabela 4.1, e h = espessura da chapa.

Tabela 4.1 Valores de C para determinação do raio mínimo de quinagem[1].

Material	Condição do material			
	Recozido		Tratado termicamente	
	\perp à DL ⁽¹⁾	\parallel à DL	\perp à DL ⁽¹⁾	\parallel à DL
Aço estampagem	0.0	0.2	0.2	0.5
Aço, AISI 1010, 1040	0.1	0.5	0.5	1.0
Aço, AISI 1015, 1020	0.2	0.6	0.6	1.2
Aço, AISI 1049	0.3	0.8	0.8	1.5
Aço, AISI 1064	0.7	1.3	1.3	2.0
Cobre	0.1	0.2	1.0	2.0
Latão	0.0	0.2	0.4	0.8
Zinco	0.5	1.0	-	-
Alumínio	0.0	0.2	0.3	0.8
Alumínio duro	1.0	1.5	3.0	4.0
Titânio	0.5	1.0	3.0	5.0

⁽¹⁾DL – Direcção de laminagem

Sempre que possível, a disposição das peças na chapa deve ser feita de modo que a direcção de quinagem se desenvolva perpendicularmente à direcção de laminagem, de modo a evitar defeitos como por exemplo fissuras. Quando não se puder ter uma direcção de quinagem perpendicular à direcção de laminagem, haverá necessidade de aumentar os raios de quinagem para se evitar a fractura[1, 4].

Segundo a norma DIN 6935, os raios interiores de quinagem devem ser seleccionados de acordo com a série apresentada na tabela 4.2 (devem ser usados preferencialmente os valores a negrito)[4].

Tabela 4.2 Valores recomendados para o raio interior de quinagem (DIN 6935).

1	1.2	1.6	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12
16	20	25	28	32	36	40	45	50	63	80	100

Existem alguns casos em que o raio mínimo de quinagem (r_{\min}) é definido em função da abertura da matriz (V)[1].

$$r_{\min} \geq \frac{5}{32} V \quad (4.15)$$

onde: V = abertura da matriz

4.1.3. Variáveis das ferramentas no processo de quinagem no ar

O raio interior de quinagem (r_i), deverá ser sempre o maior possível, de modo a minimizar o risco de fractura da peça. É habitual escolher o valor do raio do punção em função da espessura da chapa, variando entre h e 1.5h.

Os raios das ferramentas influenciam a dimensão da zona em deformação plástica durante a quinagem. Portanto, a precisão dimensional e a quantidade de recuperação elástica dependem também destes raios[5].

A abertura da matriz (V) é outro parâmetro de extrema importância que afecta significativamente a operação de quinagem. Deste parâmetro, dependem o raio mínimo de quinagem, a força de quinagem e o valor mínimo da aba que é possível obter por quinagem. Este parâmetro é geralmente seleccionado em função da espessura da chapa a quinar[1]. Segundo Rodrigues e Martins (2005)[1], a escolha da abertura da matriz deve ser realizada de acordo com a seguinte regra:

$$\begin{aligned} V &= 6 \text{ a } 8h & \text{para} & \quad h \leq 3\text{mm} \\ V &= 8 \text{ a } 12h & \text{para} & \quad h > 3\text{mm} \end{aligned} \quad (4.16)$$

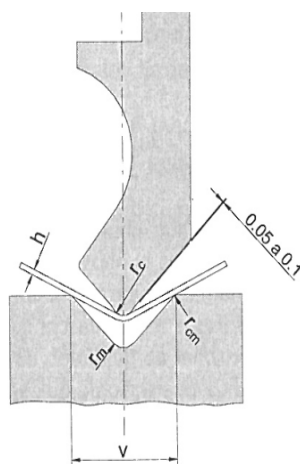


Figura 4.5 Principais variáveis das ferramentas no processo de quinagem no ar[1].

4.1.4. Dimensão da aba mínima de quinagem

A dimensão da aba mínima (a_{\min}) é a medida que garante o apoio da chapa sobre a matriz para que a operação de quinagem seja exequível e o seu valor é definido entre a linha de quinagem e a extremidade da chapa (Figura 4.6).

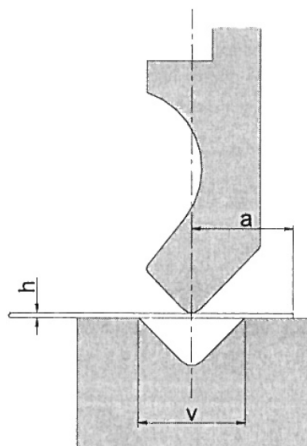


Figura 4.6 Representação da aba mínima de quinagem[1].

Esta dimensão depende claramente da abertura da matriz (V) que está a ser utilizada e o seu valor está limitado pela força disponível na quinadora e pela deformação que é imposta à chapa durante a quinagem, que depende significativamente da abertura da matriz. Logo, o conhecimento desta dimensão é de grande importância para a concepção e projecto das peças obtidas por quinagem, sendo expressa através da seguinte equação[1]:

$$a_{\min} = 0.65 V \quad (4.17)$$

4.1.5. Recuperação elástica

O fenómeno da recuperação elástica ou *springback* é geralmente definido como sendo a deformação adicional que um componente estrutural sofre após a retirada do carregamento a que foi submetido. O controlo deste fenómeno constitui uma das principais dificuldades do processo de quinagem no ar, pois provoca uma redução do raio de dobragem e aumento do raio de curvatura, alterando consequentemente a geometria final da peça. Na literatura, este fenómeno é influenciado principalmente por três variáveis: a geometria das ferramentas, o processo de fabrico e o material da chapa[9, 12].

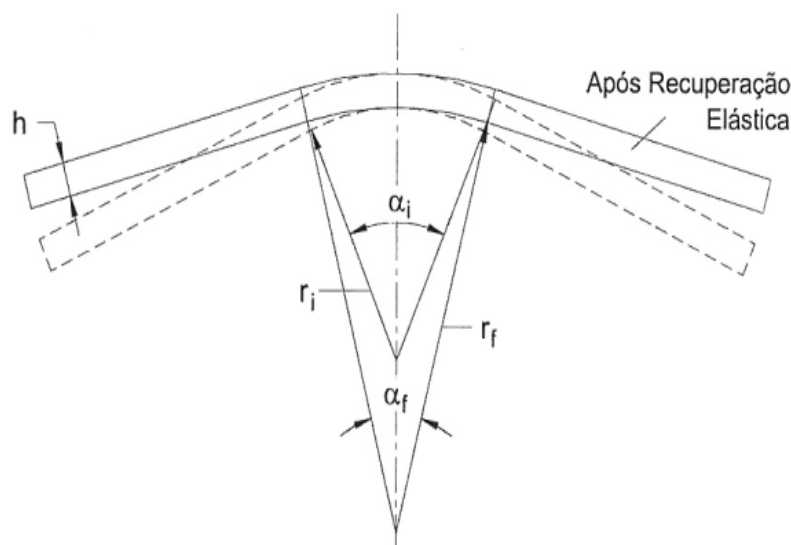


Figura 4.7 Representação esquemática do fenómeno da recuperação elástica[1].

O ciclo da carga e descarga, conduz ao aparecimento de tensões tangenciais no final da operação. Na figura 4.8, ilustra-se as tensões residuais após operação de dobragem, considerando que a deformação plástica foi realizada por um momento flector.

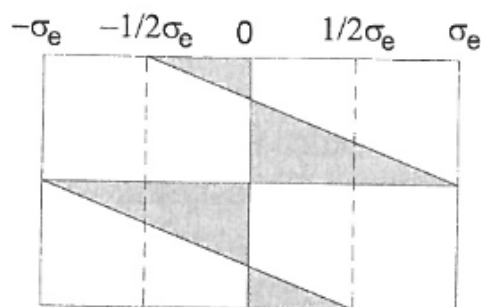


Figura 4.8 Tensões residuais na quinagem considerando que a flexão plástica foi realizada por um momento flector[1].

Uma vez que o retorno elástico é um fenómeno complexo e difícil de quantificar, apresenta-se a seguir uma expressão aproximada que permite calcular este fenómeno, a qual deverá ser utilizada quando não existir informação adicional sobre o material que se está a trabalhar. Com base na figura 4.9, na qual se representam os dois instantes que caracterizam este fenómeno (antes e após recuperação elástica), calcula-se o valor aproximado do ângulo de recuperação elástica ($\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_f$). Em primeira aproximação não se considera a curvatura por questões de simplicidade e admite-se que a rotação das secções durante este fenómeno é pequena e dá-se em torno da linha neutra da deformação

plástica. Pode-se calcular o ângulo de rotação da secção em torno da linha neutra através de[1]:

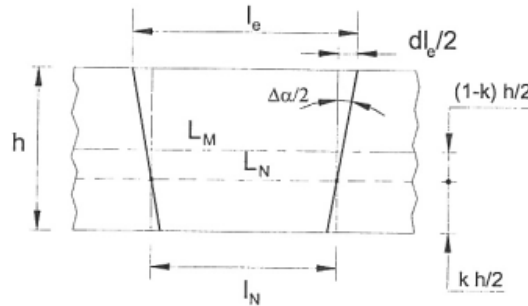


Figura 4.9 Rotação sofrida pelas secções durante a recuperação elástica[1].

$$\frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{\frac{dl_e}{2}}{\frac{h}{2} + (1-k)\frac{h}{2}} = \frac{dl_e}{h(2-k)} \quad (4.18)$$

onde:

dl_e = comprimento recuperado pela fibra exterior,

h = espessura da chapa.

Considerando a definição de extensão e tendo em conta que a recuperação dá-se em domínio elástico, onde são válidas as equações constitutivas lineares elásticas, a equação (4.18) pode ser escrita do seguinte modo[1]:

$$\Delta\alpha = -\frac{2l_e}{h(2-k)} \frac{\sigma_{\theta e}}{E} \quad (4.19)$$

onde:

l_e = comprimento inicial da fibra exterior,

$\sigma_{\theta e}$ = tensão tangencial da recuperação elástica na fibra exterior,

E = módulo de elasticidade do material da chapa.

Relacionando a variação angular da recuperação elástica com os raios de curvatura na linha neutra, temos que[1]:

$$\Delta\alpha = \left(\frac{1}{r_i + \frac{kh}{2}} - \frac{1}{r_f + \frac{kh}{2}} \right) l_N \quad (4.20)$$

onde:

r_i, r_f = raio inicial e final (após recuperação) da fibra, respectivamente.

Considerando que o comprimento inicial da fibra exterior é aproximadamente igual ao comprimento da linha neutra ($l_e \cong l_N$), igualando as duas expressões anteriores, resulta a seguinte[1]:

$$\left(\frac{1}{r_i + \frac{kh}{2}} - \frac{1}{r_f + \frac{kh}{2}} \right) = - \frac{\sigma_{\theta e}}{h(2-k)E} \quad (4.21)$$

Assumindo que a tensão de recuperação elástica é dada por $\sigma_{\theta e} = -\frac{3}{2}\sigma_e$, correspondente à recuperação elástica da deformação plástica gerada através de um momento flector, determina-se o raio interior de curvatura da quinagem (r_i) que conduz ao raio final (r_f) após recuperação elástica, através da simplificação da equação (4.21)[1].

$$r_i = \frac{r_f + \frac{kh}{2}}{1 + \frac{3\left(r_f + \frac{kh}{2}\right)\sigma_e}{h(2-k)E}} - \frac{kh}{2} \quad (4.22)$$

Alternativamente existem tabelas com dados empíricos que permitem quantificar a recuperação elástica decorrente da operação de quinagem. É habitual considerar-se que a recuperação elástica se faz em torno da linha média, obtendo-se pela constância do seu comprimento[1].

$$k_R = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{\frac{2r_i}{h} + 1}{\frac{2r_f}{h} + 1} \quad (4.23)$$

onde:

k_R = factor de recuperação elástica que depende do material, ao qual a tabela 4.3 fornece valores para vários materiais,

r_i, r_f = raios interiores antes e após recuperação elástica respectivamente, representados na figura 4.7,

h = espessura da chapa.

Tabela 4.3 Factor de recuperação elástica[1].

Material	Factor recuperação elástica, k_R	
	$r_i/h = 1$	$r_i/h = 10$
St 0-24, St 1-24	0.99	0.97
St 2-24, St 12	0.99	0.97
St 3-24, St 13	0.985	0.97
St 4-24, St 14	0.985	0.96
Aços inoxidáveis austeníticos	0.96	0.92
Aços ferríticos para elevadas temperaturas	0.99	0.97
Aços austeníticos para elevadas temperaturas	0.982	0.955
Níquel w	0.99	0.96
Al 99 5 F 7	0.99	0.98
Al Mg 1 F 13	0.98	0.90
Al Mg Mn F 18	0.985	0.935
Al Cu Mg 2 F 43	0.91	0.65
Al Zn Mg Cu 1.5 F 49	0.935	0.85

Sendo este fenómeno, uma condicionante no que refere a precisão dimensional das peças, é importante realçar alguns métodos utilizados para o seu controlo ou minimização (uma vez que eliminá-lo é uma tarefa quase impossível):

- i) correcção do valor da profundidade de quinagem com o valor correspondente ao da recuperação elástica, para o caso de operações de quinagem no ar;
- ii) compensação da geometria das ferramentas envolvidas no processo de quinagem, ou seja, é prática corrente as matrizes e os punções apresentarem ângulos menores relativamente aos que se pretende, de modo a compensar o valor do retorno elástico;
- iii) substituição da quinagem no ar pela quinagem a fundo.

4.1.6. Profundidade de quinagem

A operação de quinagem no ar apresenta uma vantagem relativamente a outros processos de dobragem de chapa, que reside no facto de se poderem obter dobragens com diferentes ângulos, utilizando o mesmo conjunto punção/matriz. Assim, será necessário relacionar o ângulo de abertura das abas (β) com a penetração do punção (p) na matriz.

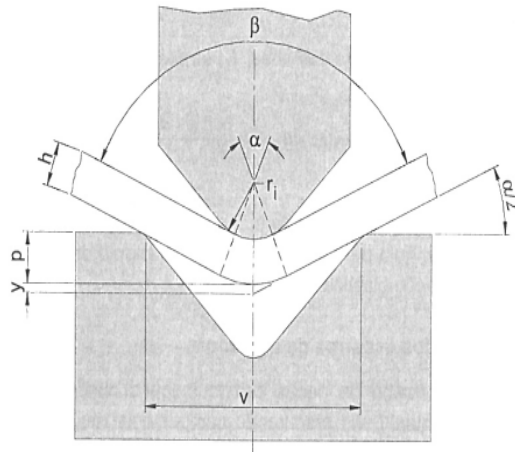


Figura 4.10 Representação da penetração do punção na matriz[1].

Para se encontrar uma expressão aproximada que quantifique a profundidade de quinagem, admite-se que a zona em deformação plástica da chapa em contacto com o punção é definida pelo ângulo de dobragem (α), suplementar do ângulo de abertura das abas (β), e que as abas se desenvolvem tangencialmente ao último ponto de contacto da chapa com o punção[1].

Para se determinar o valor da profundidade de quinagem deve-se ter em consideração a curvatura da superfície exterior da zona de dobragem. Admitindo que a espessura da chapa mantém-se constante, a profundidade de quinagem é expressa pela seguinte expressão[1]:

$$p = \frac{V}{2} \tan \frac{\alpha}{2} - y \quad (4.24)$$

onde:

V = abertura da matriz,

α = ângulo de quinagem,

y = compensação da curvatura da chapa, dada pela equação (4.25), sendo r_i o raio do punção.

$$y = (r_i + h) \left[\frac{1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \quad (4.25)$$

Substituindo o valor da compensação da curvatura na equação (4.24), obtém-se a profundidade de quinagem em função do ângulo de quinagem (α), como expressa a equação (4.26), podendo também ser determinada através do ângulo de abertura das abas dada pela equação (4.27)[1]

$$p = \frac{V}{2} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) - (r_i + h) \left[\frac{1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \quad (4.26)$$

$$p = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} - (r_i + h) \left[\frac{1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right] \quad (4.27)$$

No caso dos processos de quinagem em V, no ar, a determinação da profundidade de quinagem realiza-se corrigindo o ângulo de quinagem ou o ângulo de abertura das abas, com o valor do ângulo de recuperação elástica do material.

5. Análise estrutural de quinadoras

5.1. Introdução

A título de exemplo, apresenta-se uma metodologia corrente na obtenção de uma solução baseada em critérios simples mas de segurança assegurada (soluções conservadoras). Considere-se o diagrama de momentos flectores representados na figura 5.1 (ver dimensões no anexo A.1):

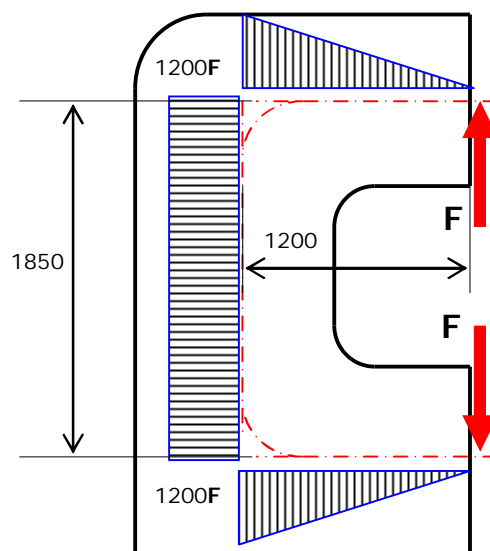


Figura 5.1 Diagrama de momentos flectores nos módulos dos montantes (tratados como vigas de elevada altura).

Simplificando o traçado do montante de modo a aproximá-lo a um conjunto composto por módulos do tipo viga de elevada altura (a linha a vermelho refere-se à posição aproximada do eixo neutro em flexão), é possível obter o diagrama de momentos flectores mostrado na fig. 5.1. Assim, o valor máximo dos momentos está indicado na figura, depois da aplicação de fórmulas elementares de Mecânica de Estruturas. Os seguintes parâmetros são necessários à solução:

- Tramo horizontal superior (tratado como elemento de viga)

Momento de inércia do tramo horizontal superior:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b \times 1000^3}{12} \quad (5.1)$$

$$I = 8.3333 \times 10^7 \times b \text{ mm}^4$$

onde b = espessura da placa do montante; aqui é incógnita a calcular.

Área tramo horizontal superior:

$$A_1 = 1000 \times b \quad (5.2)$$

- Tramo vertical (tratado como elemento de viga):

Momento de inércia do tramo vertical:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b \times 1600^3}{12} \quad (5.3)$$

$$I = 3.41333 \times 10^8 \times b \text{ mm}^4$$

Área tramo vertical:

$$A_2 = 1600 \times b \quad (5.4)$$

- Tramo horizontal inferior (tratado como elemento de viga):

Momento de inércia do tramo horizontal inferior

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b \times 1300^3}{12} \quad (5.5)$$

$$I = 1.830833 \times 10^8 \times b \text{ mm}^4$$

Área tramo horizontal inferior:

$$A_3 = 1300 \times b \quad (5.6)$$

Suponha-se que a força disponível em cada montante da máquina é de 300KN (30 Ton para uma capacidade de 60 Ton na máquina). O deslocamento δ_y que regista a abertura da cavidade de trabalho é obtido através da equação (5.7):

$$\delta_y = \frac{1}{E} \left[\frac{F \times 1200^3}{3I_1} + \frac{F \times 1200^2 \times 1850}{I_2} + \frac{F \times 1200^3}{3I_3} \right] + \frac{1}{Gk} \left[\frac{F \times 1200}{A_1} + \frac{F \times 1200^3}{A_3} \right] + \frac{1}{E} \left[\frac{F \times 1850}{A_2} \right] \quad (5.7)$$

Onde k é o factor de correcção da distorção de secção rectangular por tensões de corte e G o módulo de elasticidade transversal.

Substituindo os valores das equações (5.1), (5.2), (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6) na equação (5.7), o deslocamento é dado pela seguinte expressão:

$$\delta_y = \frac{1}{E} \left[\frac{F \times 1200^3}{(3 \times 8.3333 \times 10^7)b} + \frac{F \times 1200^2 \times 1850}{3.413 \times 10^8 b} + \frac{F \times 1200^3}{(3 \times 1.830833 \times 10^8)b} \right] + \frac{F}{Gk} \left[\frac{1200}{1000b} + \frac{1200}{1300b} \right] + \frac{1}{E} \left[\frac{F \times 1850}{1600b} \right] \quad (5.8)$$

Simplificando a equação (5.8) obtém-se a seguinte expressão:

$$\delta_y = \frac{28.6099F}{Eb} + \frac{F}{Gkb} \times 2.123 + \frac{1}{Eb} \times 1.15625F \quad (5.9)$$

Considerando que a estrutura da quinadora é em aço St37 com propriedades descritas na tabela 5.1, retiradas de Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers[13] e com $G=81000\text{N/mm}^2$ e $k=5/6$, o deslocamento é dado através da equação (5.10).

Tabela 5.1 Propriedades mecânicas do St37.

Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Elongação [%]
210	0.28	275	350	26

$$\delta_y = 1.469 \times 10^{-4} \frac{F}{b} (\text{mm}) \quad (5.10)$$

Utilizando o critério empírico de prescrever o deslocamento descrito no segundo capítulo pela equação (2.1), o deslocamento é dado pela seguinte expressão:

$$(\delta_y)_{\max} \leq 0.01 \times F_{\max} (\text{Ton}) \quad (5.11)$$

(regra bastante em uso no projecto de máquinas para conformação de chapa). Suponhamos que o montante deva suportar 300KN, como indicado acima; procuramos então qual a espessura b que satisfaça a desigualdade acima:

$$(\delta_y)_{\max} \leq 0.01 \times 30 (\text{Ton}) \Rightarrow (\delta_y)_{\max} = 0.3\text{mm} \quad (5.12)$$

O resultado para a espessura é $b = 85 \text{ mm}$; tal valor é excessivo, uma vez que o cálculo dos elementos geométricos formando o montante e interpretados como vigas na realidade são rectângulos sob estado plano de tensão, praticamente não tendo tensões de flexão dada a proximidade das dimensões do comprimento e da altura, como se fossem elementos de viga. A formulação usada é adequada apenas nos casos em que o comprimento é muito maior do que a altura, o que não foi o caso.

A fim de certificar este critério foi efectuada uma análise estrutural por elementos finitos, o que permite obter resultados muito mais realistas e precisos do que a análise anterior.

5.2. Montantes

Quanto aos resultados apresentados nas figuras seguintes é oportuno comentar o seguinte:

- i) O valor obtido para o deslocamento de abertura do entalhe no montante para permitir quinagens (de comprimentos excedendo a largura da máquina) apresentou-se em muito boa concordância com o cálculo efectuado por técnicas de aproximação elementar em mecânica das estruturas como foi possível constatar (método das áreas)
- ii) As tensões apresentam valores irrealistas (extremamente elevados) devido ao facto de se ter prescrito forças concentradas num canto como se verifica pela figura 5.2, apresentado neste caso um deslocamento máximo de 0.3695 que até se encontra em concordância com os resultados obtidos com técnicas clássicas apresentas.

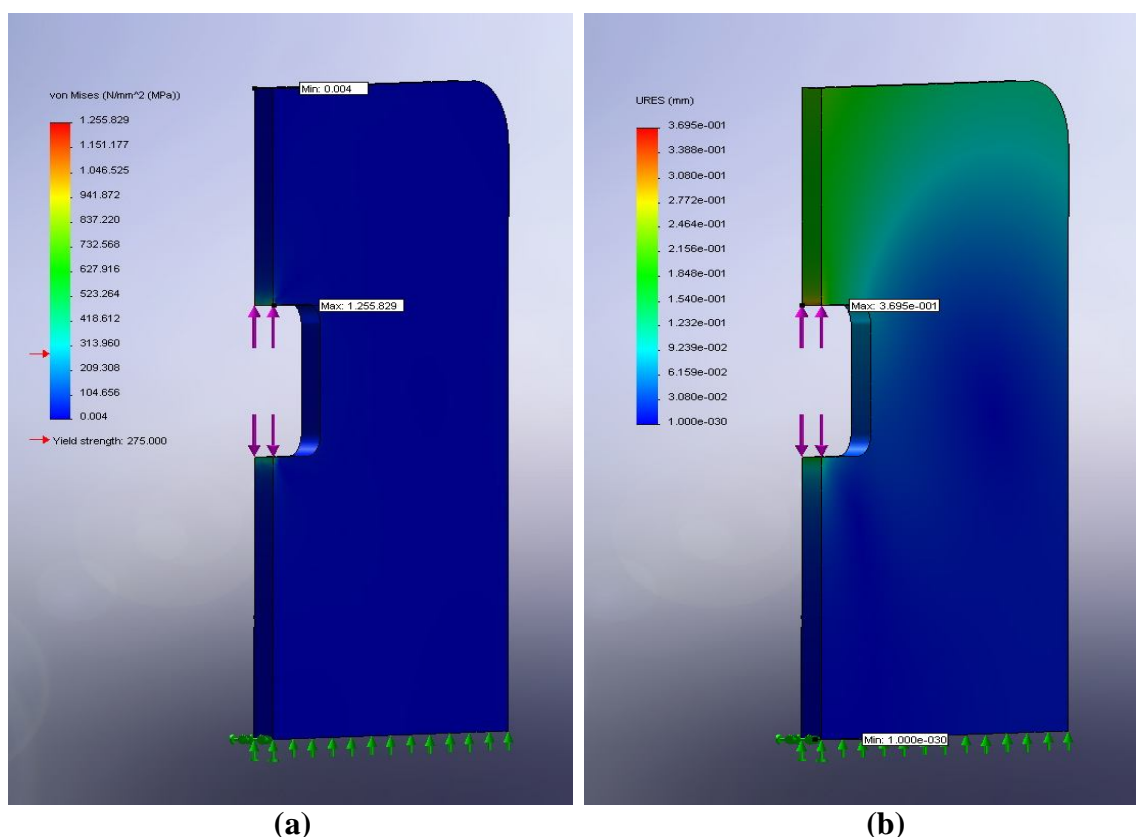


Figura 5.2 Representação da tensão de von Mises (a) e da deformação plástica (b), para força aplicada o tipo de carregamento e condições de fronteira consideradas.

O problema foi repetido com as mesmas condições estruturais mas as forças (da mesma intensidade) são agora aplicadas uniformemente sobre os bordos superior e inferior no lado do entalhe no montante como mostra figura 5.3.

Esta solução é muito mais realista, atendendo as soluções de projecto destas máquinas, atendendo à ligação soldada entre os referidos bordos no montante e os aventais fixos, como se mostra na figura 2.16 e 2.19. o resultado obtido para o afastamento mútuo é de cerca de 0.2525 mm valor não muito diferente do anterior e também em boa concordância com os resultados com o método clássico.

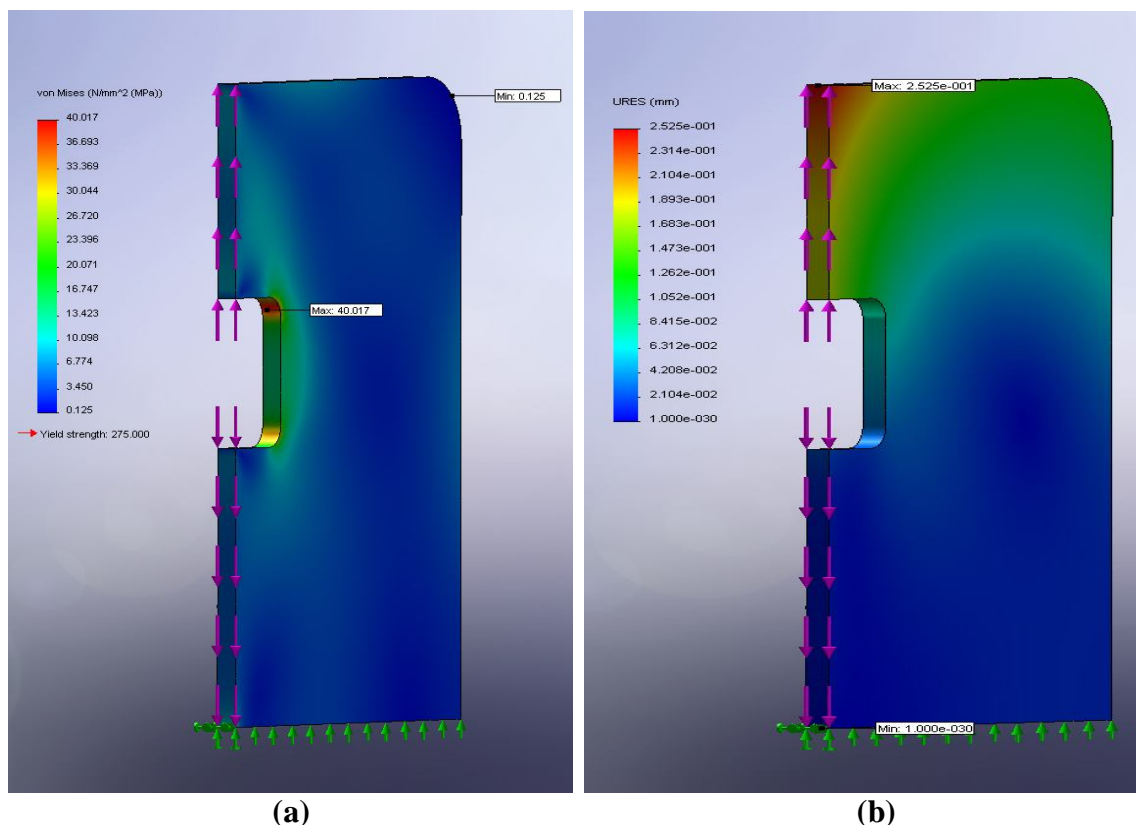


Figura 5.3 Representação da tensão de von Mises (a) e da deformação plástica (b), para força aplicada uniformemente sobre os bordos superior e inferior e respectivas condições de fronteira consideradas.

5.3. Avental móvel e fixo

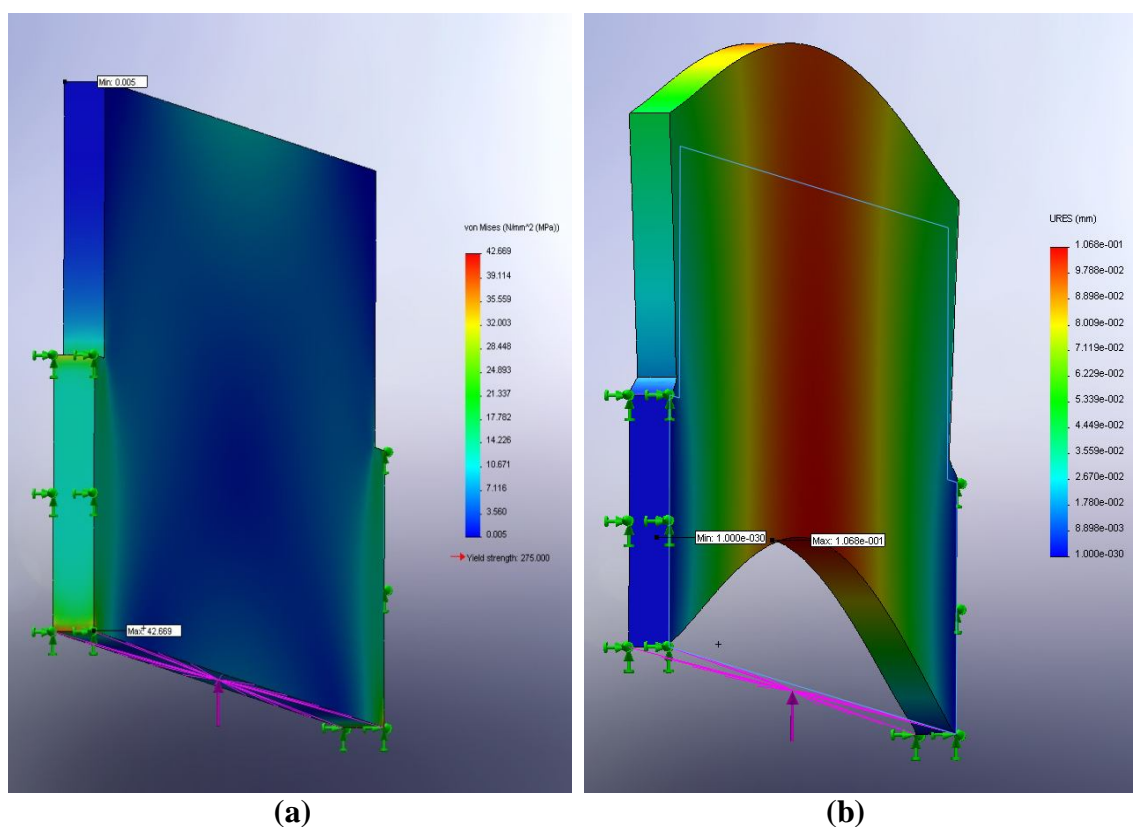
No seguimento do estudo efectuado anteriormente para o montante, apresenta-se uma análise referente à distorção e distribuição de tensões equivalente de von Mises para o avental móvel e fixo respectivamente (nas máquinas de projecto mais frequente é o avental superior) estas peças têm um desenho muito simples (ver anexos A.3 e A.4), muito semelhante a uma placa submetida a esforços existentes no seu plano. O estudo seguinte foi efectuado com elementos finitos em elasticidade 2D equivalente a uma flexão em 3 pontos para uma viga de grande altura. O carregamento consiste numa força praticamente concentrada a meio vão, tendo os aventais suportados pelos bordos extremos como um

rígido sistema de guias para o avental móvel e um encastramento por união soldada o avental fixo.

O resultado referente aos deslocamentos e distribuição das tensões encontra-se detalhado nas figuras seguintes onde se pode verificar que a máxima intensidade do campo dos deslocamentos e tensão equivalente de von Mises atesta a elevada rigidez das peças analisadas, como se pode verificar através da tabela 5.1. Contudo é importante referir que é uma opção preferível ter situações destas em projecto uma vez que esta máquina apresentará um melhor desempenho quanto menor for o nível de distorção da estrutura.

Tabela 5.2 Representação dos valores máximos de tensão de von Mises e de deslocamento.

	Avental móvel	Avental fixo
Tensão de von Mises (MPa)	42.669	23.508
Deslocamento (mm)	0.1068	0.05



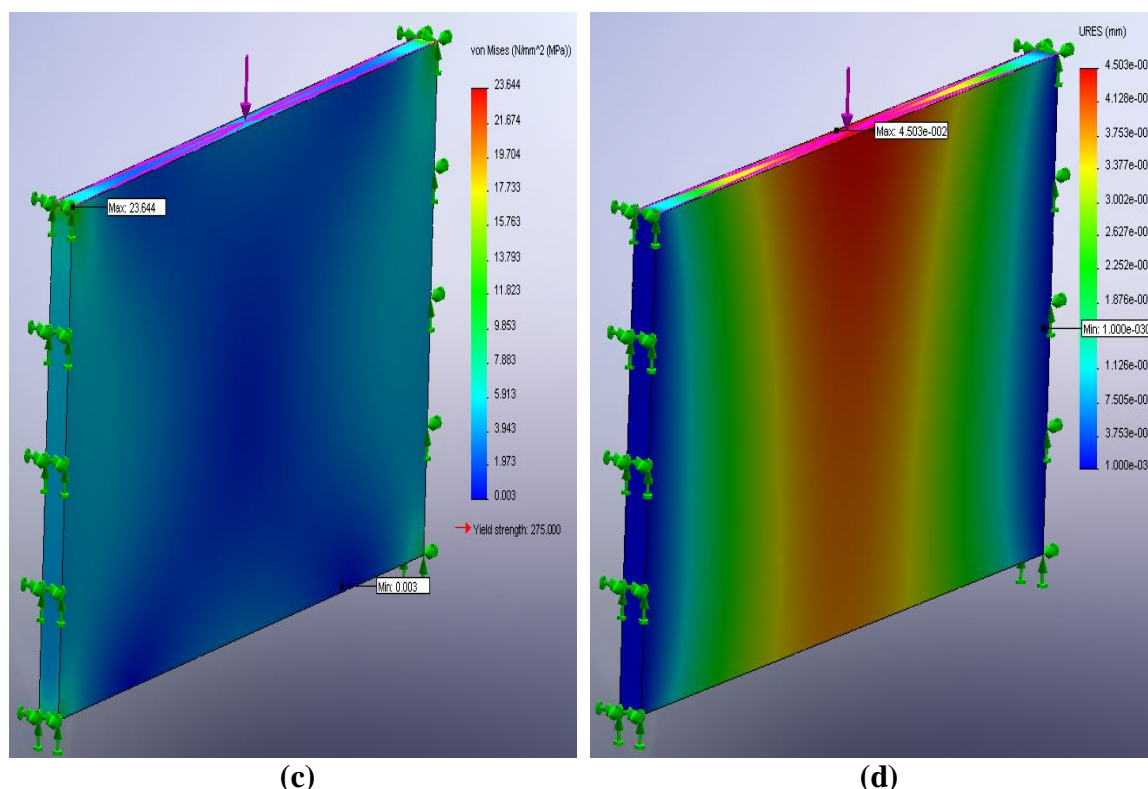


Figura 5.4 Representação da tensão de von Mises e do deslocamento do avental móvel (a) e (b) e do avental fixo (c) e (d).

5.4. Optimização estrutural

O desenho proposto nas figuras anteriores não se refere especificamente a nenhum modelo ou a solução de projecto que tenha sido efectuada; antes, destina-se a comprovar que usando critérios simples de cálculo, tendo como objectivo a redução de material mantendo a rigidez do componente, se pode obter soluções de valor. No caso exemplificado na figura 5.4, que consiste numa acção elementar de optimização estrutural para o avental fixo (ver anexos A.5), o que foi feito consistiu basicamente em retirar material numa zona do componente onde o estado de tensão é diminuto, que é precisamente a zona dos cantos do avental nos apoios (equivalentes a ligação soldada dos extremos aos montantes da máquina), como se representa na figura 5.5.

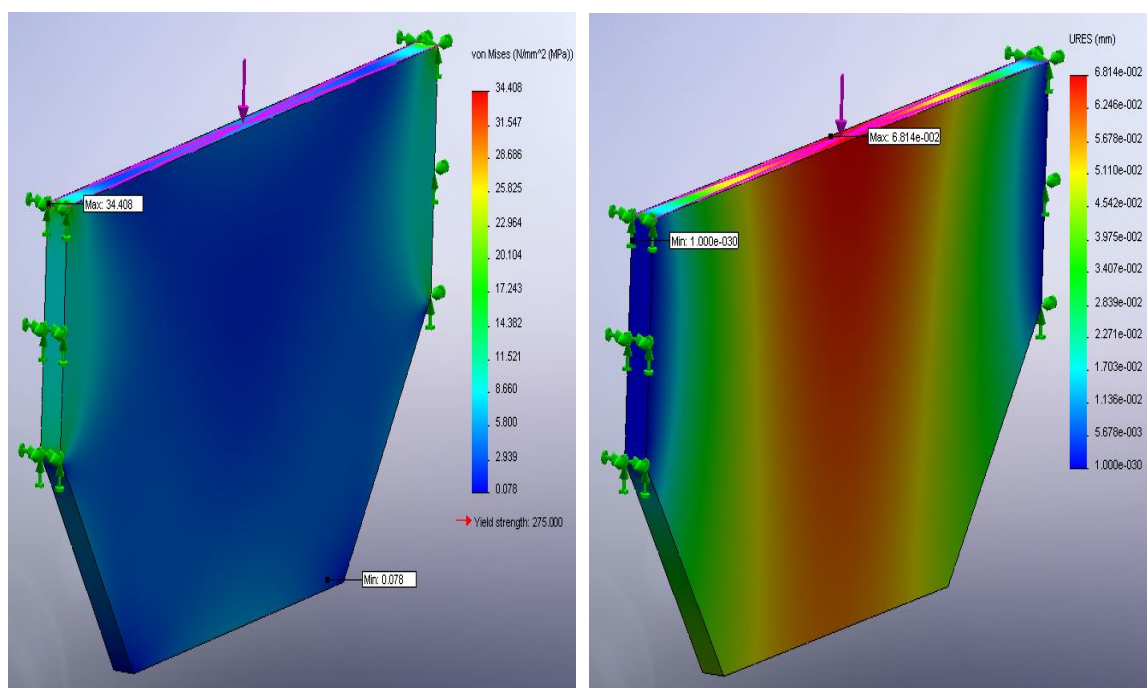


Figura 5.5 Representação da tensão de von Mises e do deslocamento sofrido pelo avental fixo otimizado.

Na tabela seguinte reúnem-se os valores máximos das tensões e deslocamentos obtidos após otimização do avental móvel e fixo, relativamente ao carregamento aplicado de 600 kN.

Tabela 5.3 Valores máximos de tensão, deslocamento e peso para ao avental fixo original e otimizado.

	Original	Optimizado
	Avental fixo	Avental fixo
Tensão de von Mises (MPa)	23.644	34.408
Deslocamento (mm)	0.04503	0.06814
Massa (kg)	2585.70	2305.58

A mesma estratégia foi aplicada à revisão do desenho dos montantes, onde também se constatou existirem zonas inertes quanto ao estado de tensão, nomeadamente no canto superior (ver anexo A.2), o desenho revisto está indicado na figura 5.6 onde se verifica que a retirada do material não alterou as características estruturais do componente, mostrando os resultados referentes ao deslocamento máximo no entalhe um valor muito semelhante ao obtido para a geometria antes de retirada de material.

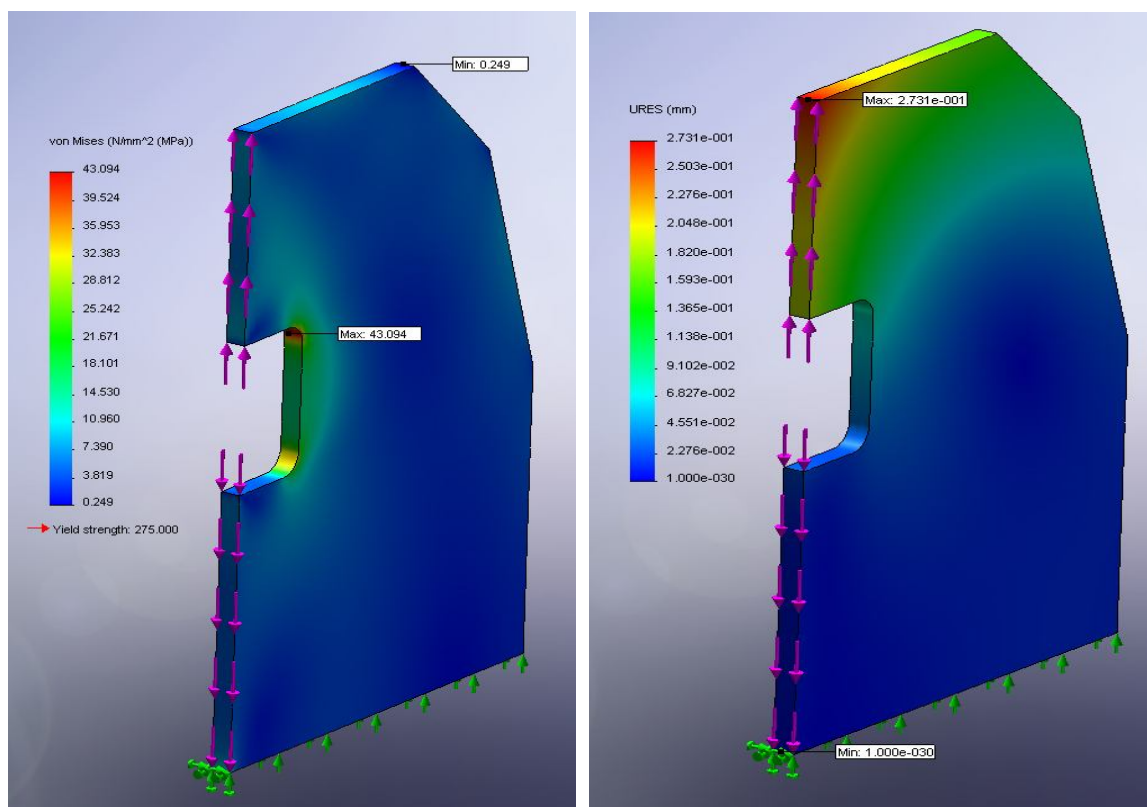


Figura 5.6 Representação da tensão de von Mises e do deslocamento sofrido pelo(s) montante(s) otimizado(s).

Tabela 5.4 Valores máximos de tensão, deslocamento e peso para o montante original e otimizado.

	Original	Otimizado
	Avental fixo	Avental fixo
Tensão de von Mises (MPa)	40.017	43.094
Deslocamento (mm)	0.2525	0.2731
Massa (kg)	3782.40	3443.19

6. Modelação do processo de quinagem em V no ar pelo método dos elementos finitos

6.1. Método dos elementos finitos

Antes do aparecimento do Método de Elementos Finitos (MEF), grande parte de problemas em análise estrutural eram resolvidos analiticamente combinando as equações de equilíbrio com as relações constitutivas do material. Tais parâmetros integram-se nas relações constitutivas do material, as quais podem caracterizar deformações lineares ou não, assim como em regime elástico ou plástico. A combinação das equações de equilíbrio e as relações tensão-deformação têm quase sempre a forma de um sistema de equações diferenciais em derivadas parciais, normalmente de solução integral difícil sob a forma de expressões analíticas; para além desta dificuldade, acresce-se a geometria das peças, muitas vezes complicada e quase sempre de tratamento igualmente difícil quanto à especificação de condições de fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica a problemas mais complexos, era comum recorrer a séries de Fourier[14]. Devido à sua complexidade, estes procedimentos eram aplicáveis a meios de geometria simples e homogênea. Para tentar ultrapassar algumas destas limitações, era frequente a substituição de derivadas exactas por derivadas aproximadas, calculadas com base em grelhas de pontos. Da aplicação desta técnica resulta o método das diferenças finitas, que, antes do aparecimento dos computadores, apresentava o inconveniente de requerer a resolução de grandes sistemas de equações lineares. Devido à morosidade associada à resolução destas equações, tornava-se muito atractiva a substituição do problema real por outro semelhante, de modo a se poder recorrer a resultados publicados em tabelas ou ábacos[15].

Com o grande desenvolvimento que o MEF teve na década de 60 e com a banalização do recurso ao computador, passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento[16].

Os grandes passos do desenvolvimento do MEF, que o conduziram ao formato actual, foram dados na década de 60 e início da de 70. Inicialmente os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros[16].

Nos dias de hoje, o recurso à utilização de métodos numéricos torna-se uma mais valia em trabalhos de investigação, e para várias áreas no ramo das engenharias, como por exemplo, mecânica estrutural, mecânica dos fluidos, electromagnetismo, transferência de calor, conformação de chapa metálica, etc.

O método dos elementos finitos (MEF ou *FEM* em inglês) é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais através do uso do método dos resíduos pesados. Este é empregue em diversas áreas da engenharia, como referido anteriormente em, onde as equações diferenciais podem definir o comportamento dos casos de estudo, tendo em consideração as necessárias condições de fronteira e de parâmetros iniciais.

Devido a sua rapidez de cálculo e custo relativamente baixo, constitui uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de projectos de engenharia e investigação.

Basicamente, a análise com base no método dos elementos finitos pode ser resumida nas seguintes etapas:

- modelação do problema real em análise;
- geração da malha de elementos finitos;
- definição do sistema de cargas e condições iniciais;
- definição de condições de fronteira;
- atribuição de materiais e respectivas propriedades;
- cálculo numérico;
- visualização e análise dos resultados.

6.2. Considerações

Neste ponto assume-se algumas considerações básicas sobre os parâmetros de quinagem, bem como sobre as características do material a deformar como se descreve a seguir:

- i) a chapa é considerada como um corpo contínuo, ou seja, não contém nenhum espaço vazio,
- ii) o material da chapa a conformar é considerado homogéneo e isotrópico. A consideração deste pressuposto significa que as propriedades do material não variam com a direcção ou orientação,

- iii) considera-se estado plano de deformação (largura da chapa a ser quinada é muito maior que a espessura da mesma),
- iv) considera-se que o volume mantém-se constante durante todo o processo de deformação da chapa.

A figura 6.1 representa o modelo geométrico utilizado na simulação do processo de quinagem de chapa metálica através da análise de elementos finitos. Na mesma encontram-se representadas as ferramentas envolvidas no processo de quinagem de chapa em V (no ar). Neste modelo, considera-se que o punção (1) e a matriz (3) são ferramentas rígidas no processo de quinagem, ou seja, não sofrem qualquer deformação, sendo apenas a chapa (2) deformável durante o processo.

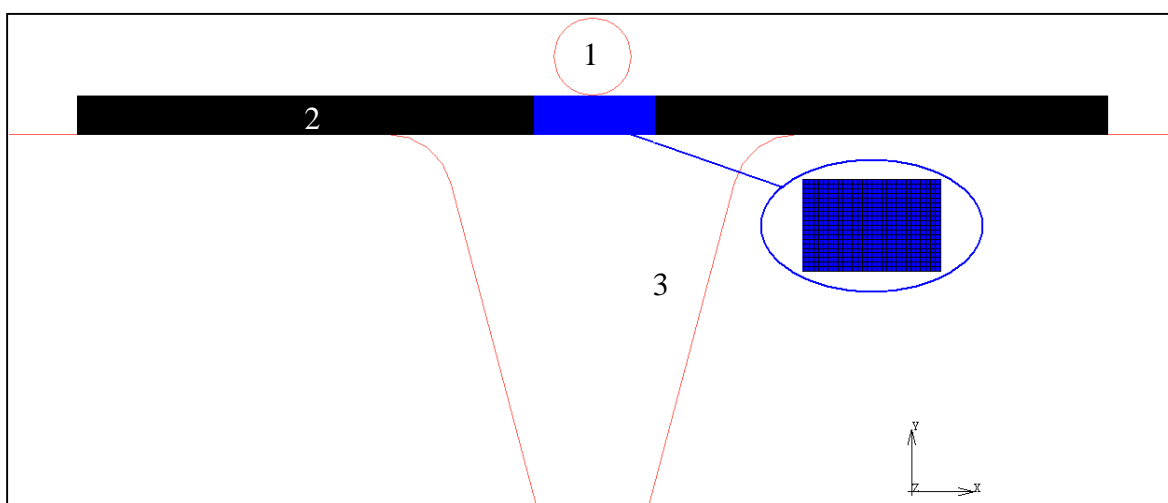


Figura 6.1 Modelo geométrico utilizado para a simulação.

6.3. Descrição dos materiais utilizados

Na simulação de processos de conformação metálica, um dos factores mais importantes a considerar é a relação entre tensão deformação. No processo de quinagem em V no ar, a deformação da chapa é causada, como referido em §2.2, pela acção do deslocamento de um punção contra a chapa metálica.

A propriedade elástica do material é definida através do módulo de elasticidade, ou módulo de Young (E) e uma tensão limite designada por tensão de cedência. Quando o valor limite de cedência é ultrapassado, o material começa a deformar plasticamente.

Na figura 6.2, representa-se uma curva de tensão deformação de um material, em que se encontram representadas entre os pontos 1 e 2 o regime elástico do material (lei de

Hooke). O ponto 2 representa a tensão de cedência do material, ou seja, o ponto a partir do qual o material começa a deformar plasticamente, e o ponto 3 representa o ponto limite de resistência a tracção (tensão de rotura), que corresponde a maior tensão que o material pode resistir (tensão de tracção na curva é máxima), se esta tensão for aplicada e mantida, o resultado será a fractura do material. A curva entre os pontos 2 e 4 representa a deformação plástica considerando que o material não sofre encruamento. A curva entre os pontos 2 e 3 fornece uma representação mais precisa da deformação plástica, sofrida pela chapa durante o processo de quinagem, considerando o encruamento do material. Para as simulações efectuadas, considerou-se o encruamento do material.

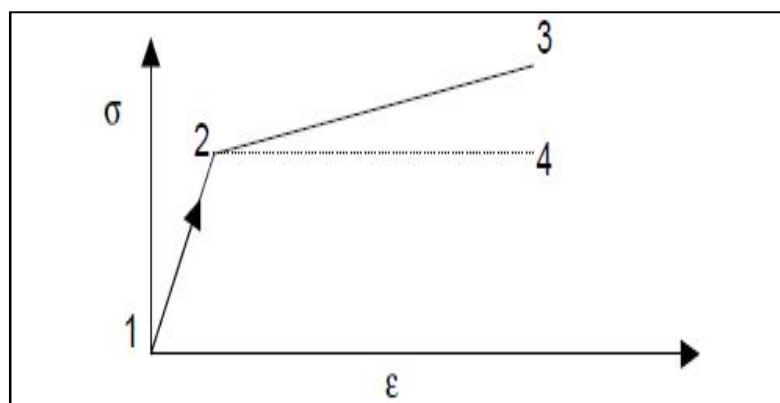


Figura 6.2 Representação da curva tensão deformação linear elástica e encruamento.

Os materiais adoptados na simulação para o estudo do fenómeno de recuperação elástica são os seguintes: alumínio AL2024-T3 e o aço AISI 1010. O aço St37 foi utilizado na estrutura da quinadora.

Alumínio AL2024-T3

O alumínio foi escolhido devido a sua alta resistência (quando trabalhado adequadamente) e baixo peso, bem como, por apresentar uma boa maquinabilidade e boas características no que refere ao acabamento superficial. Este material devido às suas características é amplamente utilizado na indústria automóvel e aeroespacial[17]. As propriedades deste material são retiradas de Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers[13], e encontram-se representadas nas tabelas seguintes:

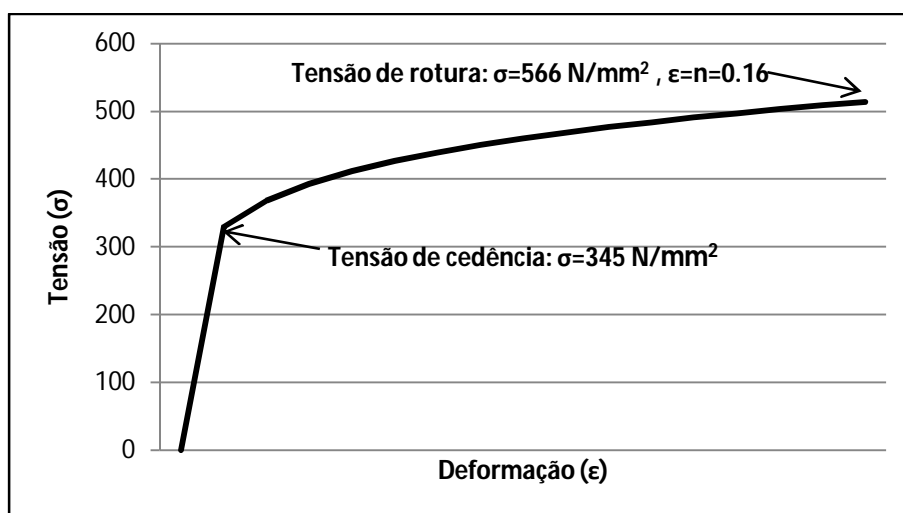
Tabela 6.1 Propriedades mecânicas do alumínio AL2024-T3[13].

Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Elongação [%]
73.1	0.33	345	566	18

Tabela 6.2 Valores do coeficiente de resistência (k) em [MPa] e coeficiente de encruamento (n), para o alumínio [13].

Coeficiente de resistência (k)	Coeficiente de encruamento (n)
689	0.16

O alumínio em causa adoptado para a simulação apresenta a seguinte lei de encruamento $\bar{\sigma} = 689\bar{\epsilon}^{0.16}$ [MPa], sendo representada na figura 6.3 a curva de tensão-deformação do mesmo.

**Figura 6.3 Curva tensão deformação do alumínio AL2024-T3[13].**

Aço AISI 1010

Este material é amplamente utilizado em aplicações de baixa resistência. É um aço de baixo teor em carbono que apresenta boa conformabilidade a frio, e é muitas vezes utilizado em operações de quinagem e estampagem profunda. Este material é amplamente utilizado na indústria automóvel em diversas aplicações, tais como, carroçarias e guardalamas. As propriedades deste material foram retiradas de Mark's Standard Handbook for

Mechanical Engineers[13], tendo em conta o encruamento, e encontram-se representadas nas tabelas seguintes:

Tabela 6.3 Propriedades mecânicas do aço AISI 1010[18].

Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Elongação [%]
205	0.3	280	512	20

Tabela 6.4 Valores do coeficiente de resistência (k) em [MPa] e coeficiente de encruamento (n), para o aço[18].

Coeficiente de resistência (k)	Coeficiente de encruamento (n)
715	0.22

O aço em causa adoptado para a simulação apresenta a seguinte lei de encruamento $\bar{\sigma} = 715\bar{\epsilon}^{0.22}$ [MPa], sendo representada na figura 6.4 a curva de tensão-deformação obedecendo a lei de encruamento apresentada.

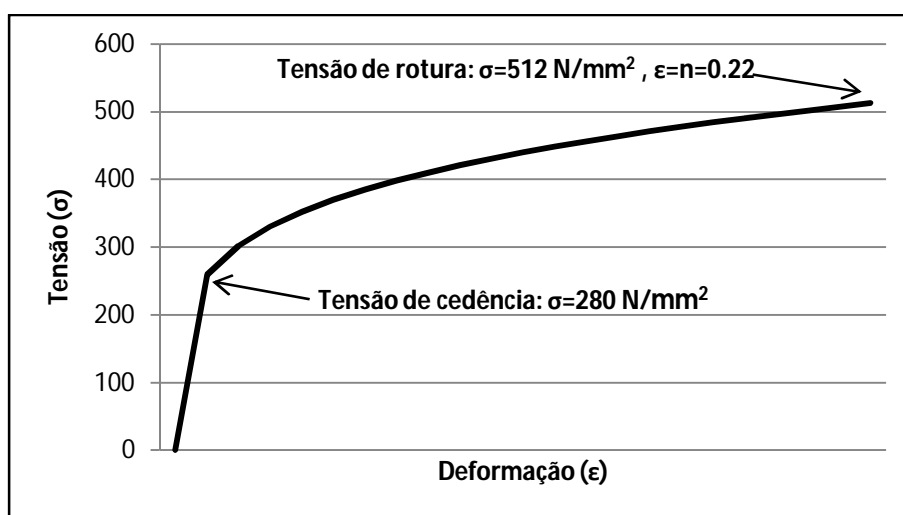


Figura 6.4 Curva tensão deformação do aço AISI 1010[13].

6.4. Descrição dos ensaios realizados

De modo a realizar-se uma avaliação do fenómeno da recuperação elástica decorrentes do processo de quinagem, foram realizados ensaios numéricos através do software de simulação de elementos finitos, MSC.Marc, considerando-se para o efeito que a chapa e as restantes ferramentas envolvidas no processo, são bidimensionais, como se ilustra na figura 6.1.

Com auxílio do programa de elementos finitos utilizado, realizaram-se simulações numéricas com o objectivo de avaliar a influência que alguns parâmetros do processo de quinagem, em V no ar, têm sobre o fenómeno da recuperação elástica. Para o efeito, as simulações realizadas consideraram os seguintes parâmetros:

- raio do punção $r_c = 2, 3$ e 5 mm;
- espessura da matriz $h = 3, 5$ e 7 mm;
- abertura da matriz em função da espessura da chapa $V = 6h, 8h, 10h, 12h$;
- profundidade de quinagem $p = 9, 15$ e 22 mm;
- coeficiente de atrito $\mu = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$.

De notar que as simulações numéricas considerando a componente de atrito, foram realizadas utilizando o modelo de atrito de Coulomb.

Uma vez que se considera que a chapa é o único elemento deformável no processo, após a modelação geométrica, procede-se à introdução das propriedades mecânicas da chapa referentes aos materiais escolhidos para o efeito.

A criação de malhas de elementos finitos é um processo de extrema importância no contexto da simulação de fenómenos físicos por computador, especialmente quando as técnicas numéricas empregadas para resolver equações diferenciais associadas ao fenómeno são baseadas no método de elementos finitos. A geração de malhas de elementos finitos consiste, basicamente em, dividir uma determinada geometria de interesse em n elementos finitos. Geometrias bidimensionais podem ser divididas em quadriláteros ou triângulos, enquanto que, geometrias tridimensionais podem ser divididas em tetraedros, pentaedros ou hexaedros. O grau de precisão dos resultados depende do grau de refinamento da malha.

O MSC.Marc contém uma extensa biblioteca de elementos finitos que fornecem uma cobertura do estado plano de tensão e deformação, entre outras. Nos ensaios realizados, utiliza-se para construção da malha da chapa, elementos quadriláteros de quatro

nós, quatro pontos de integração para estado plano de deformação, elemento da biblioteca do “Marc”, utilizado em aplicações de deformação plana, representado na figura 6.5[19].

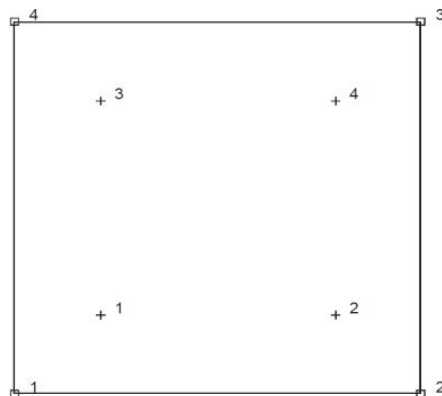


Figura 6.5 Elemento 11 (4 nós e 4 pontos de integração)[19].

No que concerne às condições de fronteira, sobre a chapa, foi adicionada uma condição sobre os nós do eixo da chapa com o objectivo de impedir o deslocamento da chapa ao longo eixo dos x, como ilustra a figura 6.6, durante o processo de quinagem.

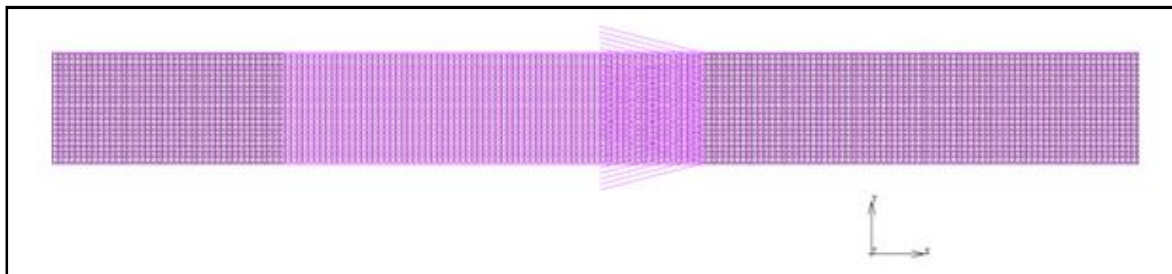


Figura 6.6 Condições de fronteira aplicadas a chapa.

Posteriormente, foram atribuídas condições de contacto entre o punção e a chapa e entre a matriz e a chapa, considerando que a chapa é o único corpo que sofre deformação no processo. No entanto considera-se que o punção e a matriz são corpos rígidos. A condição de fronteira para o punção foi a de um deslocamento imposto que permitiu controlar a profundidade de quinagem. À matriz é introduzida uma condição de fronteira que inicialmente mantém a matriz fixa durante a dobragem e depois desloca-se ao mesmo tempo e em sentido oposto ao do retorno do punção permitindo assim verificar e determinar a recuperação elástica.

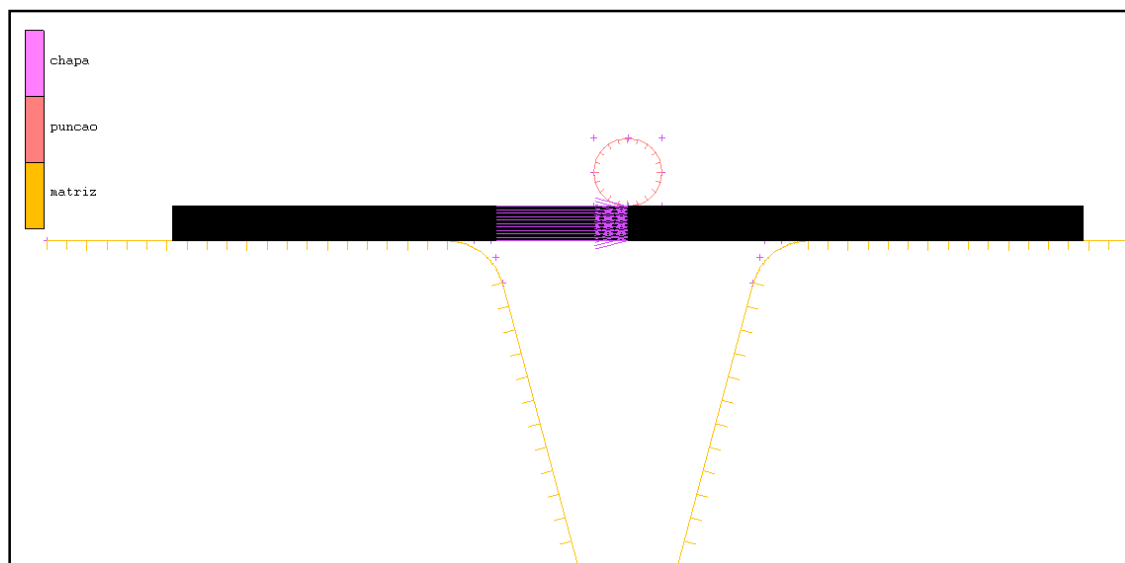


Figura 6.7 Representação das condições de fronteira utilizadas para a simulação do processo de quinagem em V.

7. Resultados e discussões

7.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através das simulações realizadas recorrendo ao programa de simulação, MSC.Marc. Os resultados são expostos com base em alguns parâmetros que influenciam o processo de quinagem de chapa metálica, que por sua vez afectam a recuperação elástica das chapas dobradas por este processo. Importante lembrar que para as simulações de quinagem em V, no ar, considera-se que o punção e a matriz são corpos rígidos (não sofrem deformação), sendo a chapa o único componente que sofre deformação, sendo desta forma o componente sobre o qual incide o estudo do retorno elástico. São ilustrados essencialmente como é que os parâmetros de quinagem como a abertura da matriz, o raio da ponta do punção, a espessura da chapa a ser quinada, a profundidade de quinagem, bem como a componente de atrito, influenciam a recuperação elástica, bem como a força de quinagem.

7.2. Efeitos da espessura da chapa

7.2.1. Efeitos da espessura da chapa na recuperação elástica

Através das simulações realizadas, foi possível observar o efeito que a espessura da chapa tem relativamente a recuperação elástica. Assim sendo, para o estudo deste efeito consideram-se chapas de aço com propriedades descritas em §6.3, punções e matrizes com características mecânicas e geométricas apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 7.1 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo do efeito da espessura da chapa na recuperação elástica.

Espessura (mm)	Punção (mm)	Abertura da matriz (V)	Material
3	5	56	AISI 1010
5			
7			

Na figura 7.1 ilustram-se os valores de recuperação elástica obtidos em função da espessura do material. De acordo com a figura, é visível que a recuperação elástica da chapa diminui com o aumento da espessura da chapa. De salientar ainda que se verifica

uma diminuição de aproximadamente 25%, do retorno elástico, na quinagem de chapa de 5mm relativamente à de 3mm.

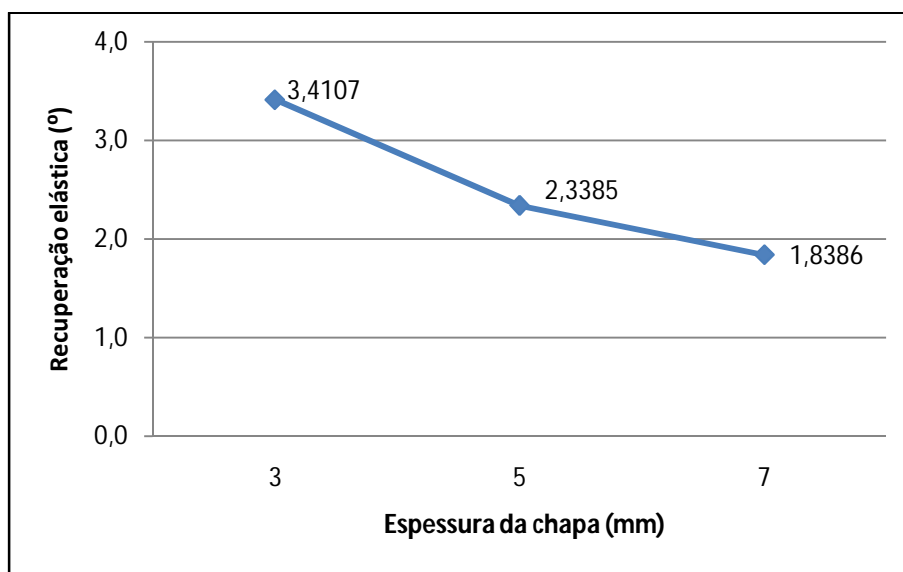
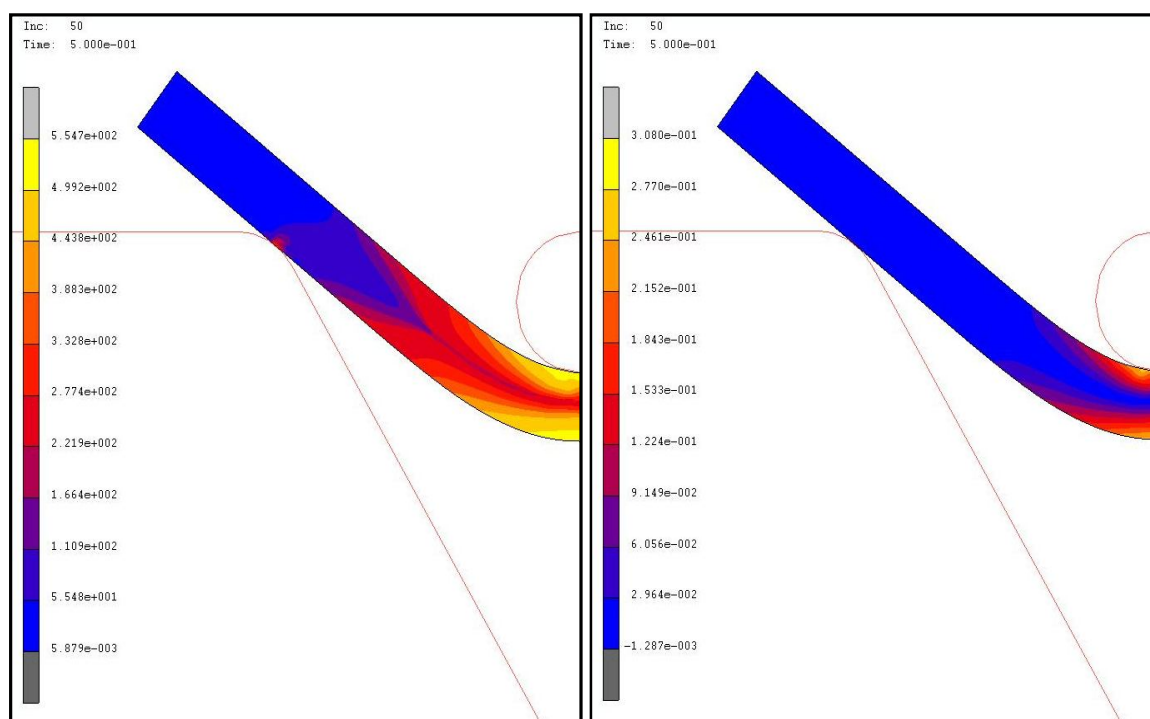
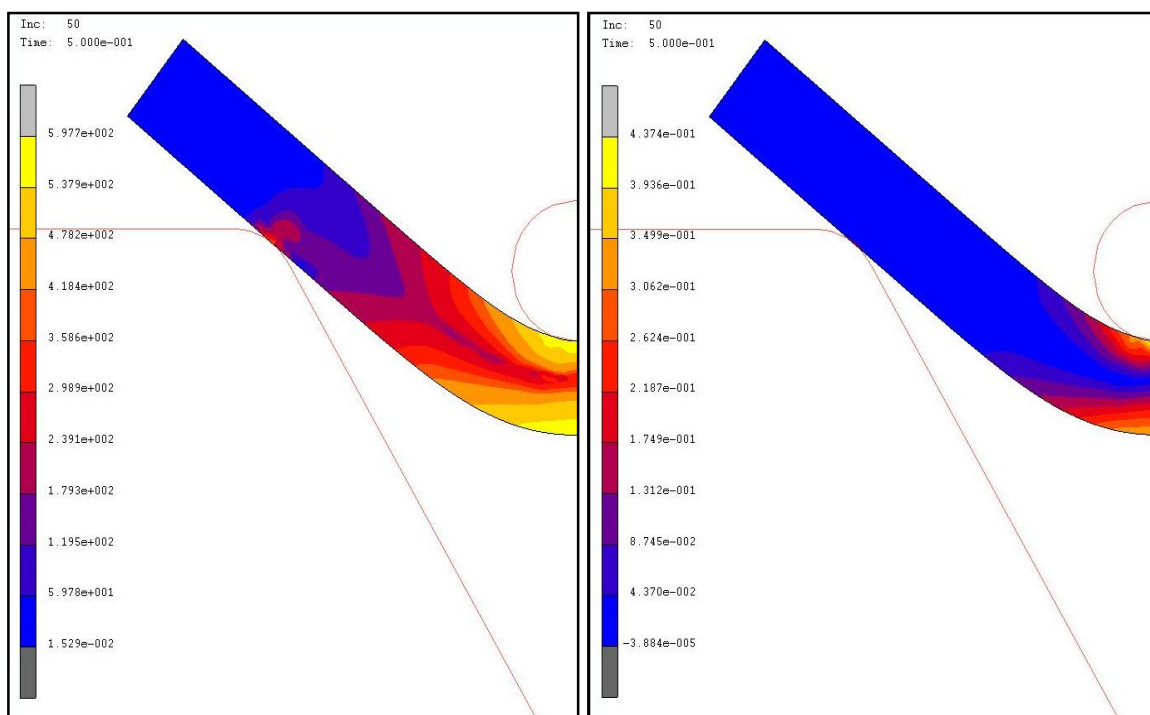


Figura 7.1 Recuperação elástica em função da espessura da chapa.

Através da figura 7.2, verifica-se que a tensão de von Mises e a deformação plástica aumentam com o aumento da espessura da chapa. Este aumento é ilustrado na tabela 7.2, onde se representam os valores máximos de tensão equivalente de von Mises e de deformação plástica, bem como a recuperação elástica decorrente do processo de dobragem. Deste modo, pode-se concluir que no processo de quinagem as chapas de maior espessura deformam mais plasticamente, pois o material torna-se mais resistente, resultando numa menor recuperação elástica da chapa.

Tabela 7.2 Efeito da espessura da chapa na tensão de von Mises e na deformação plástica máxima.

Espessura (mm)	Tensão von Mises (MPa)	Deformação plástica	Recuperação elastic (°)
3	489.6	0.1776	3.4107
5	554.7	0.3080	2.3385
7	597.7	0.4374	1.8386



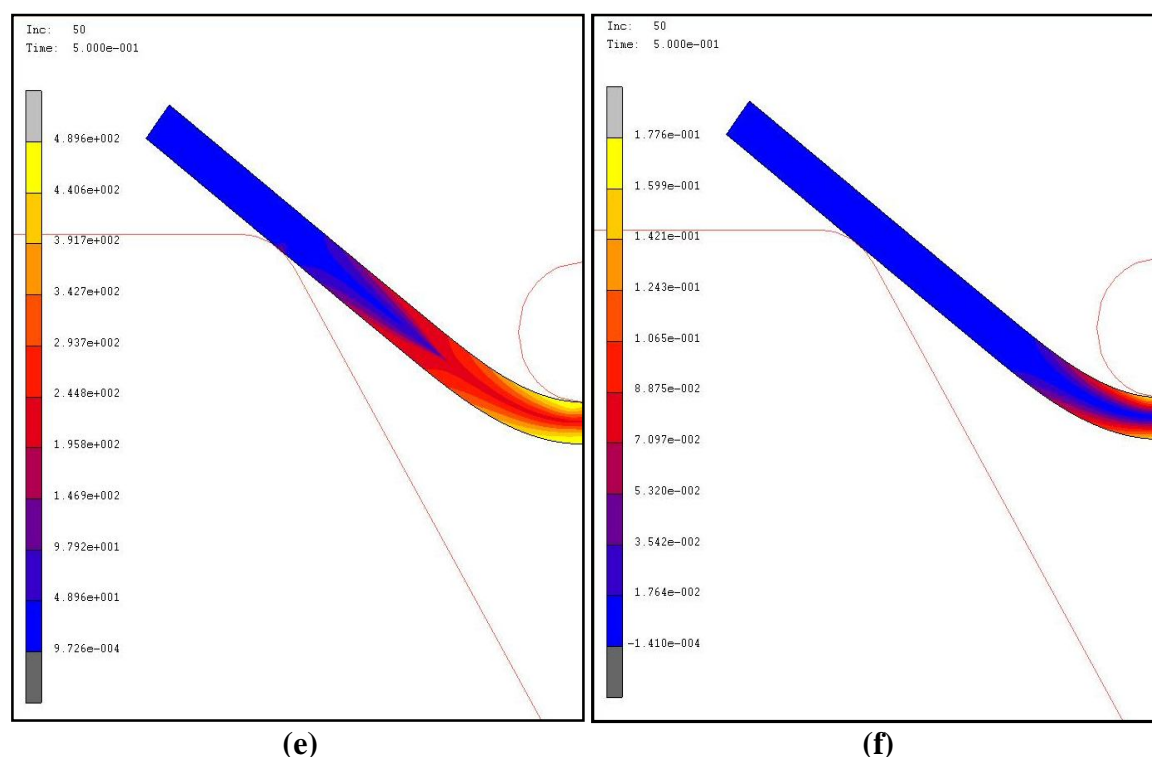


Figura 7.2 Influência da espessura da chapa na tensão de von Mises: a) espessura 7mm, c) espessura 5mm, e) espessura 3mm; e na deformação plástica equivalente: b) espessura 7mm, d) espessura 5mm, f) espessura 3mm.

7.3. Efeito do raio da ponta do punção/raio do cunho

7.3.1. Efeitos do raio do punção na recuperação elástica

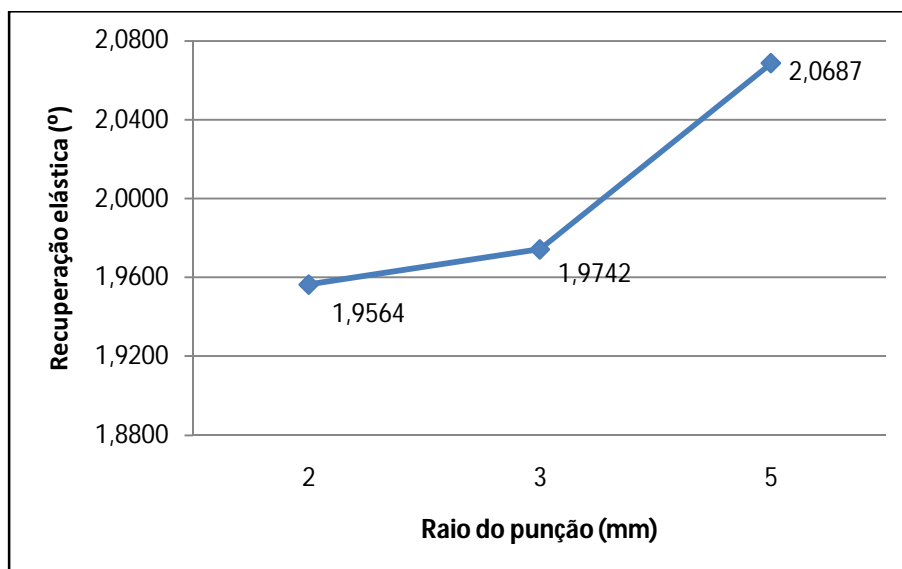
Neste ponto verifica-se a influência da geometria do punção, nomeadamente o raio de ponta da ferramenta, na recuperação elástica. Consideram-se para o estudo deste efeito, três punções com raios distintos e assume-se uma chapa com espessura e uma abertura da matriz fixa, como se representa na tabela 7.3.

Após a realização das simulações, observa-se uma ligeira dependência da recuperação elástica da chapa relativamente aos raios do punção utilizados. Utiliza-se para o estudo do fenómeno uma chapa de aço com propriedades descritas em §6.3, punções e matrizes rígidos, com características apresentadas na tabela 7.3.

Tabela 7.3 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo do efeito do raio do punção no fenómeno de recuperação elástica.

Raio do punção (mm)	Espessura (mm)	Abertura da matriz (V)	Material
2	5	30	AISI 1010
3			
5			

A figura 7.3 ilustra a dependência do fenómeno da recuperação elástica relativamente ao raio do punção. De acordo com a mesma, é possível verificar que a recuperação elástica da chapa aumentou com o aumento do raio do punção, sendo o aumento verificado inferior a 5%, para os raios dos punções considerados.

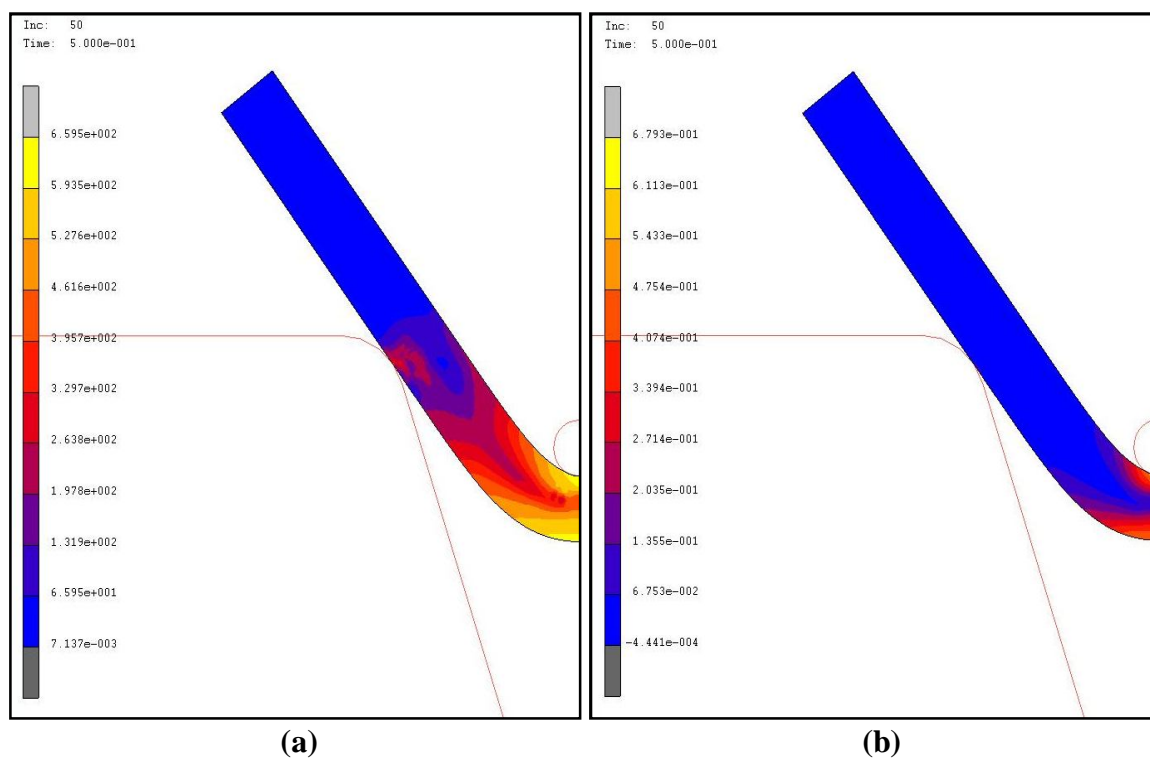
**Figura 7.3 Recuperação elástica em função do raio do punção.**

Pode-se verificar através da visualização das figuras 7.4 que a tensão de von Mises e a deformação plástica diminuem com o aumento do raio do punção. Como complemento à figura 7.4, representam-se na tabela 7.4 os valores máximos obtidos, de tensão e deformação, bem como a correspondente recuperação elástica da chapa. Apesar de não se verificar uma variação muito significativa da recuperação elástica, é possível verificar que a utilização de punções com menor raio originam maiores valores de tensão e deformação plástica, verificando-se igualmente um valor de recuperação elástica menor. Verifica-se

deste modo que quanto menos o material se deforma plasticamente, maior é o retorno elástico.

Tabela 7.4 Efeito do raio do punção na tensão de von Mises e na deformação plástica máxima.

Raio do punção (mm)	Tensão von Mises (MPa)	Deformação plástica	Recuperação elástica (°)
2	659.5	0.6793	1.9564
3	654.3	0.6569	1.9742
5	613.7	0.4919	2.0687



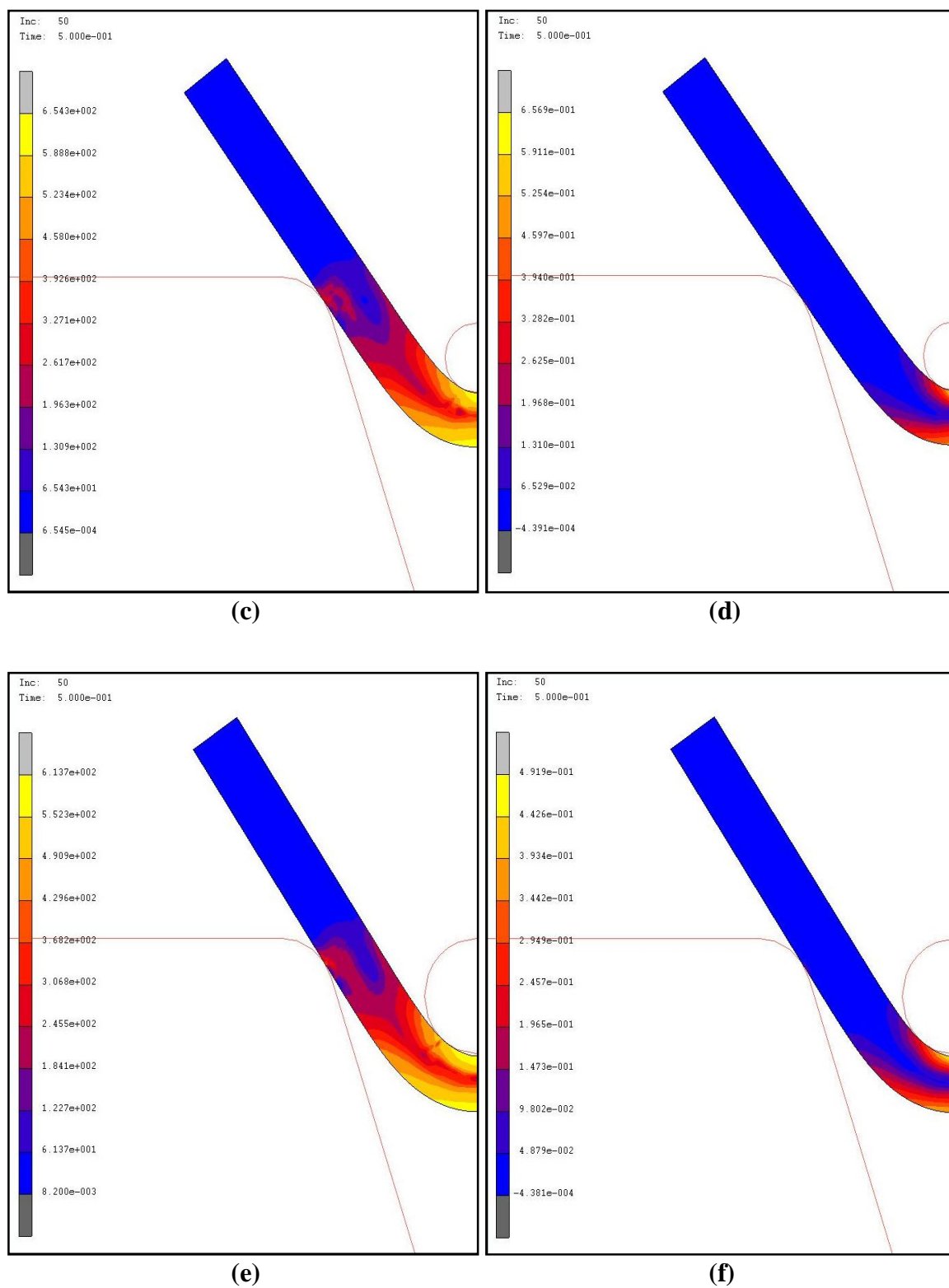


Figura 7.4 Influência do raio do punção na tensão de von Mises: a) raio 2mm, c) raio 3mm, e) raio 5mm; e na deformação plástica equivalente: b) raio 2mm, d) raio 3mm, f) raio 5mm.

7.4. Efeito da abertura da matriz

7.4.1. Efeito da abertura da matriz na recuperação elástica

A abertura da matriz é um parâmetro de grande relevância na operação de quinagem de chapa. Após realização de algumas simulações, foi possível observar a dependência da recuperação elástica da chapa relativamente a diferentes aberturas da matriz consideradas. Para verificação desta dependência, consideram-se as características apresentadas na tabela 7.5.

Tabela 7.5 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo do efeito da abertura da matriz na recuperação elástica.

Abertura da matriz (mm)	Espessura (mm)	Punção (mm)	Material
6h	5	3	AISI 1010
8h			
10h			
12h			

Com os resultados ilustrados na figura 7.5 é possível verificar que a recuperação elástica aumenta à medida que se aumenta a abertura da matriz, verificando-se um aumento aproximadamente igual a 10%.

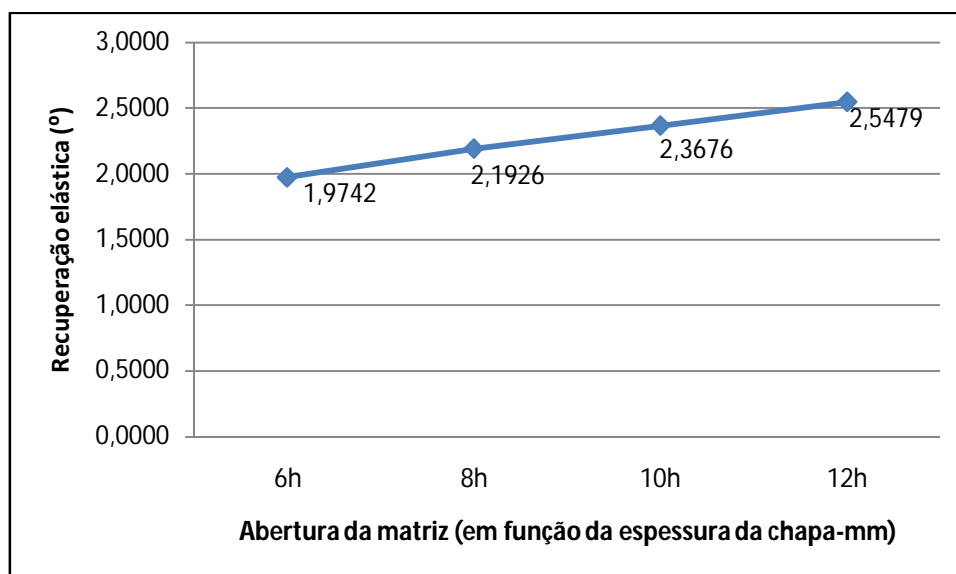
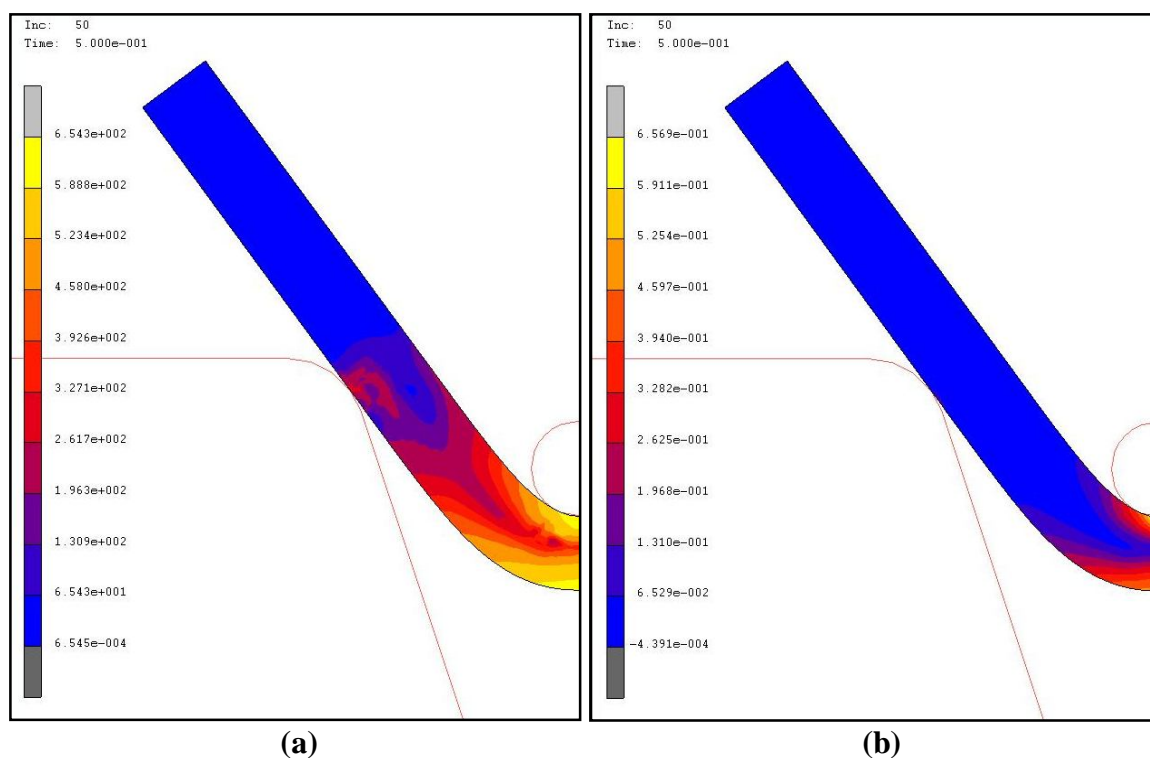


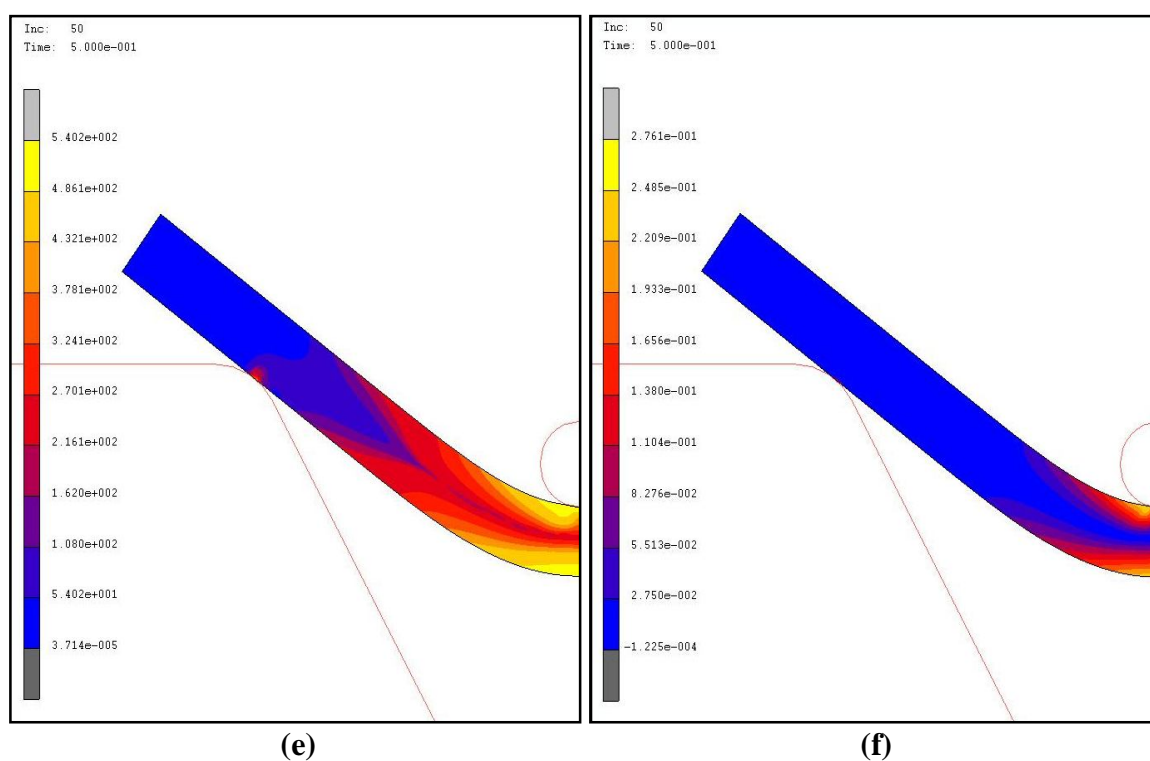
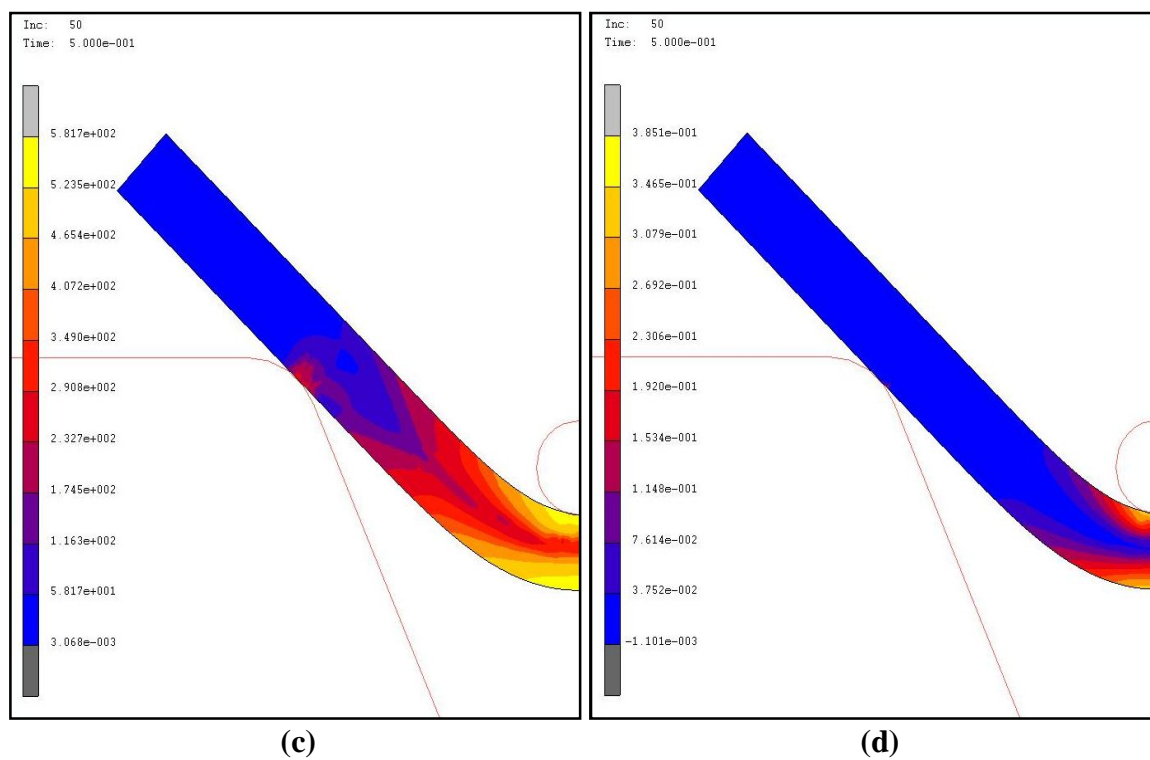
Figura 7.5 Recuperação elástica em função da abertura da matriz.

Pode-se verificar através da visualização da figura 7.6 que a tensão de von Mises e a deformação plástica diminuem com aumento da abertura da matriz. Esta diminuição é igualmente ilustrada na tabela 7.6, onde se representam os valores máximos de tensão e deformação plástica obtidos durante a simulação do processo de dobragem. Deste modo verifica-se, que a tensão e a deformação plástica sofrida pela chapa é tanto maior quanto menor for a abertura considerada (no caso $V = 6h$). Mais uma vez, verifica-se a tendência para o aumento da recuperação elástica quando a deformação plástica decorrente do processo de quinagem de chapa é menor.

Tabela 7.6 Efeito da abertura da matriz na tensão de von Mises e na deformação plástica máxima.

Abertura da matriz (mm)	Tensão de von Mises (MPa)	Deformação plástica	Recuperação elástica (°)
6h	654.3	0.6569	1.9742
8h	581.7	0.3851	2.1926
10h	540.2	0.2761	2.3676
12h	497.8	0.1896	2.5479





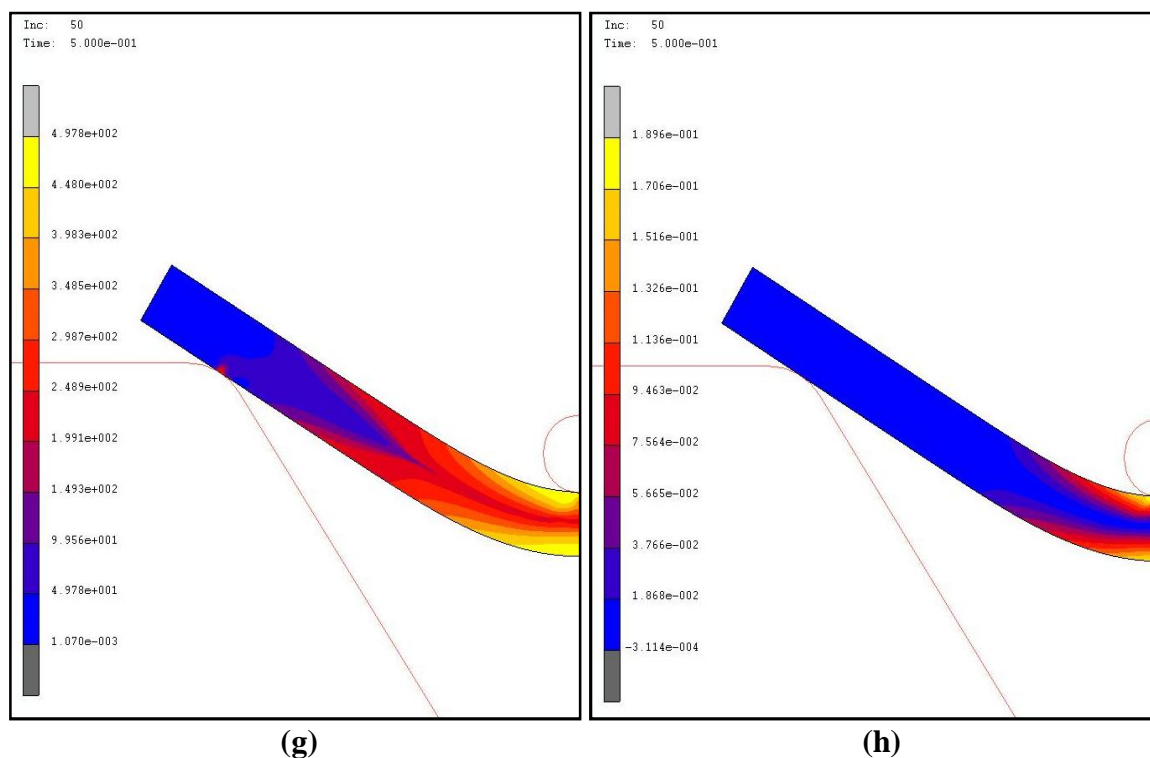


Figura 7.6 Influência da abertura da matriz (V) na tensão de von Mises: a) V = 6h, c) V = 8h, e) V = 10h, g) V = 12h; e na deformação plástica equivalente: b) V = 6h, d) V = 8h, f) V = 10h, h) V = 12h.

7.5. Efeito da profundidade de quinagem

7.5.1. Efeito da profundidade de quinagem na recuperação elástica

A profundidade de quinagem é um parâmetro do processo de quinagem de chapa metálica indispensável para o controle do retorno elástico na quinagem em V, no ar. Nesta secção verifica-se a influência da profundidade de quinagem sobre a recuperação elástica, considerando-se para o estudo deste efeito, que a chapa é quinada considerando três profundidades distintas com características descritas na tabela 7.7.

Tabela 7.7 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo da profundidade de quinagem na recuperação elástica.

Profundidade de quinagem (mm)	Raio Punção (mm)	Espessura (mm)	Abertura da matriz V	Material
9	3	5	8h	AISI 1010
15				
22				

Na figura 7.7 ilustram-se os valores de recuperação elástica obtidos em função da profundidade de quinagem e verifica-se que a recuperação elástica é maior para profundidades de quinagem maiores, sendo os aumentos de aproximadamente 15% para as profundidades consideradas.

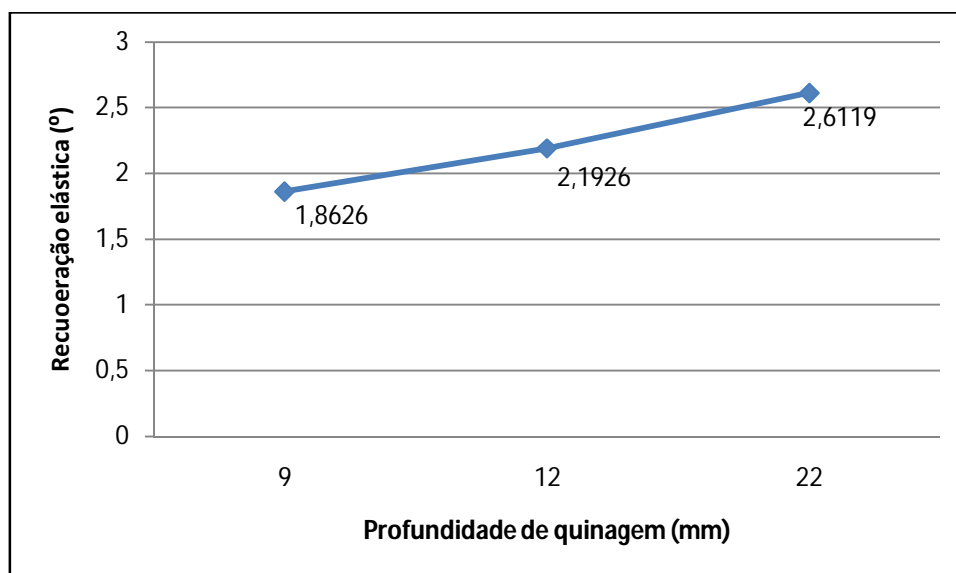
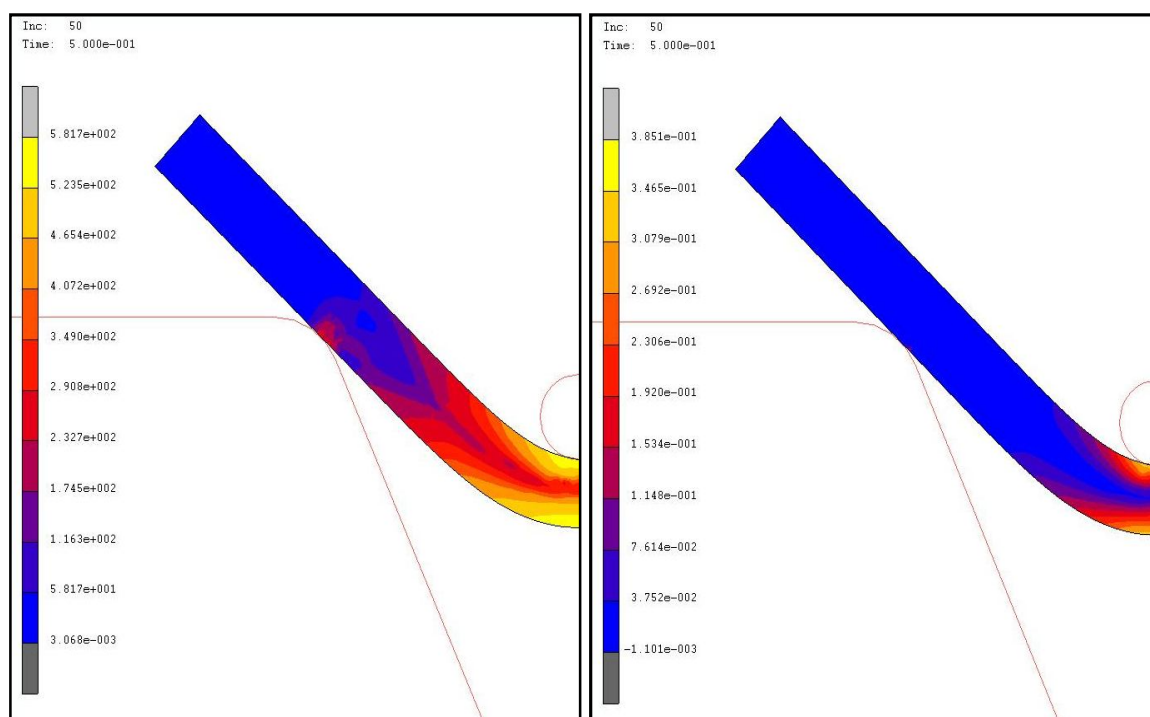
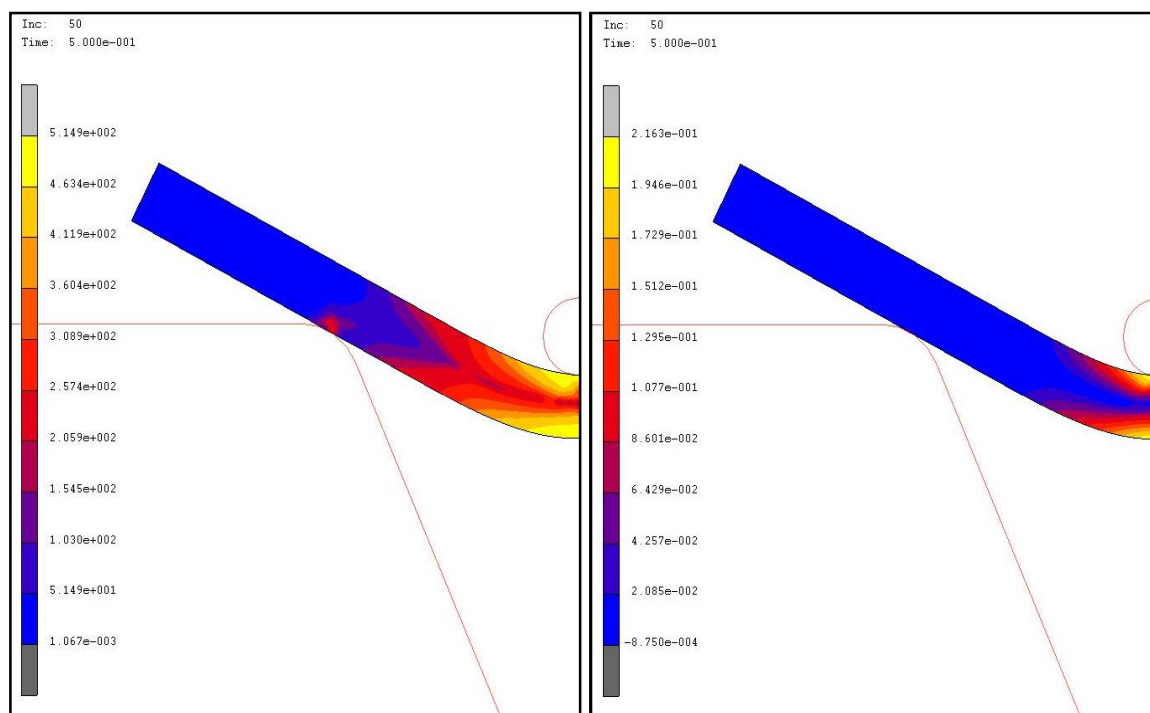


Figura 7.7 Efeito da profundidade de quinagem na recuperação elástica.

Pode-se verificar através da visualização da figura 7.8 que a tensão e a deformação plástica aumentam com aumento da profundidade de quinagem. Na tabela 7.8 encontram-se representados os valores máximos de tensão, deformação e correspondente recuperação elástica, para as profundidades consideradas.

Tabela 7.8 Tensão de von Mises e deformação plástica máxima em função da profundidade.

Profundidade de quinagem (mm)	Tensão von Mises (MPa)	Deformação plástica	Recuperação elástica (°)
9	514.9	0.2163	1.8626
15	581.7	0.3851	2.1926
22	618.3	0.5080	2.6119



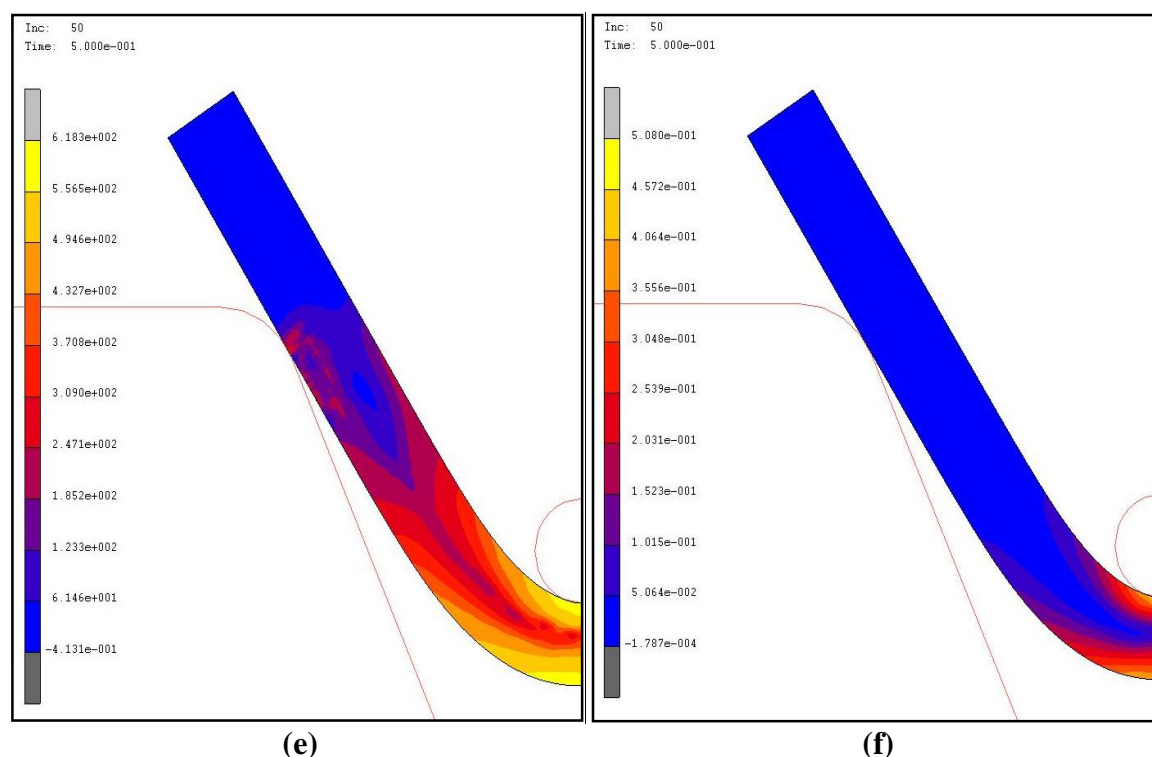


Figura 7.8 Influência da profundidade de quinagem (p) na tensão de von Mises: a) $p = 9$ mm, c) $p = 15$ mm, e) $p = 22$ mm; e na deformação plástica equivalente: b) $p = 9$ mm, d) $p = 15$ mm, f) $p = 22$ mm.

Nas análises anteriores verificou-se a tendência de quanto maior a deformação plástica menor a recuperação elástica.

Através da tabela 7.8, verifica-se neste caso que a recuperação elástica da chapa é maior quando a deformação plástica é maior (para a maior profundidade considerada (22 mm)). A explicação para este caso prende-se com o facto de que a energia de deformação elástica armazenada durante o processo de quinagem é maior para profundidades maiores, como se pode verificar através da figura 7.9. Obviamente, quando esta energia é libertada, resulta um valor maior de recuperação elástica maior.

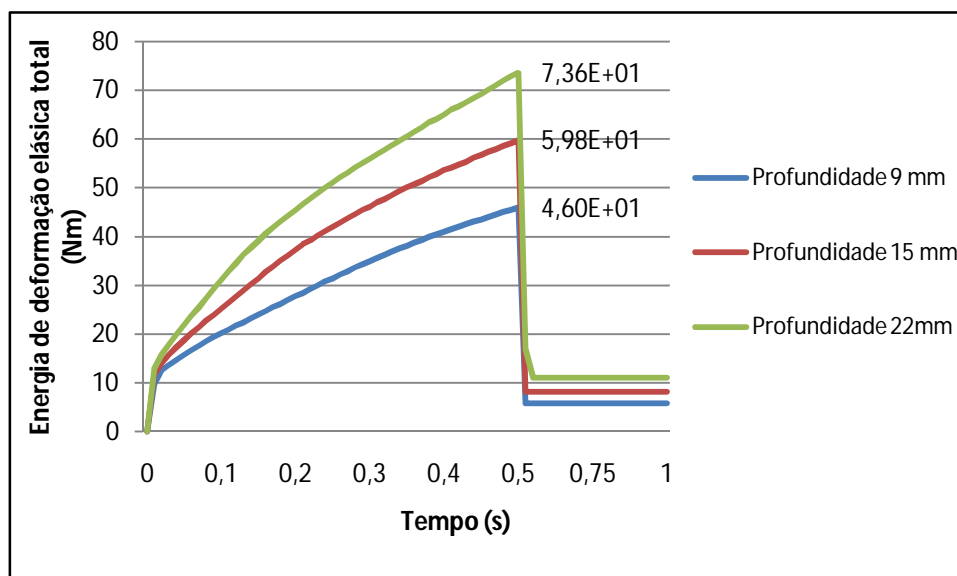


Figura 7.9 Energia de deformação elástica.

7.6. Efeito do atrito

7.6.1. Efeito do atrito na recuperação elástica

O efeito do coeficiente de atrito no fenómeno de recuperação elástica foi determinado através da utilização do modelo de Coulomb para coeficientes de atrito (μ) diferentes, considerando um intervalo de valores entre 0.1 e 0.5 com um incremento de 0.1, como ilustra a tabela seguinte:

Tabela 7.9 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo do efeito do coeficiente de atrito na recuperação elástica.

Coeficiente de atrito	Raio Punção (mm)	Espessura (mm)	Abertura da matriz V (mm)	Material
0.1	3	5	8h	AISI 1010
0.2				
0.3				
0.4				
0.5				

Na figura 7.10 ilustram-se os valores de recuperação elástica obtidos em função da variação do coeficiente de atrito. Verifica-se que para o coeficiente de atrito de 0.5, obtém-

se o maior valor de recuperação elástica da chapa. De salientar que na variação dos coeficientes de atrito, a variação na recuperação elástica é inferior à 3%.

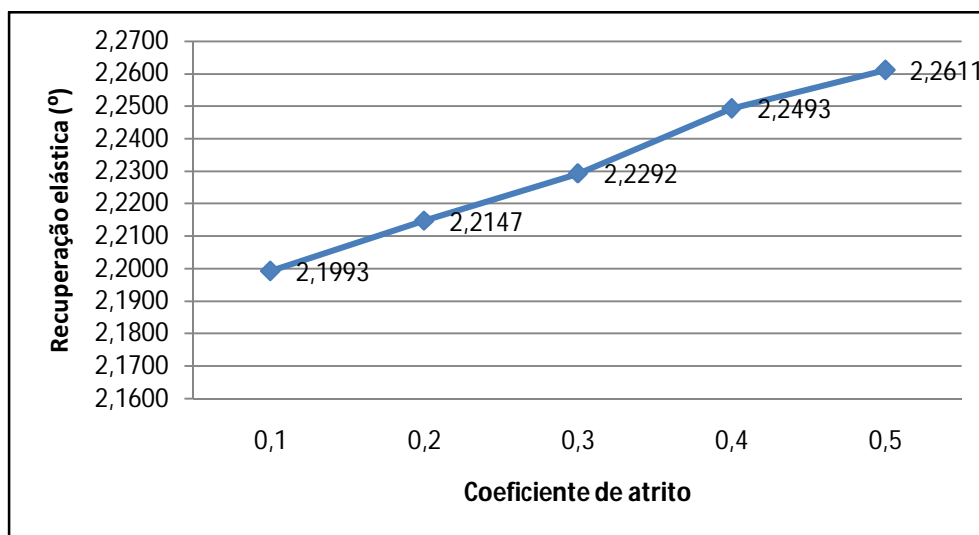


Figura 7.10 Efeito do atrito na recuperação elástica.

Considerando uma simulação com os mesmos parâmetros geométricos, mas sem efeito do atrito, o retorno elástico é de 2.1926° , correspondendo a uma variação de cerca de 3% comparativamente a consideração de um coeficiente de atrito de 0.5, permitindo verificar que o efeito do atrito é pouco significativo para o retorno elástico.

7.7. Efeito do material da chapa

7.7.1. Efeito do tipo material da chapa na recuperação elástica

O tipo de material é um factor a ter em conta no processo de quinagem de chapa, nomeadamente as suas propriedades mecânicas, e ainda, é preciso ter em conta que alguns materiais tendem a encruar mais que outros quando submetidos a deformação plástica.

Para o estudo do efeito do material sobre a recuperação elástica da chapa foram utilizados dois materiais com propriedades mecânicas distintas, nomeadamente, o aço AISI 1010 e o alumínio AL2024-T3. Na tabela 7.10 apresentam-se as características para o modelo em estudo:

Tabela 7.10 Características mecânicas e geométricas utilizadas para o estudo do efeito do coeficiente de atrito na recuperação elástica.

Material	Raio Punção (mm)	Espessura (mm)	Abertura da matriz V (mm)
AISI 1010	3	5	8h
AL2024-T3			

Os valores obtidos para ambos, considerando as características geométricas descritas na tabela 7.10, sem atrito, são de 2.2078° e 6.1667° para o aço e para o alumínio respectivamente. Verifica-se que a recuperação elástica é afectada pelo módulo de elasticidade, ou seja, um módulo de elasticidade mais baixo (caso do alumínio), origina uma maior recuperação elástica e consequentemente uma maior dificuldade no controlo das dimensões finais da peça. Pode-se ainda concluir que quanto maior a rigidez (neste caso, módulo de Young) menor será a recuperação elástica (ver equação 3.20).

A figura 7.11 é representativa da tensão e deformação plástica, obtidos para o alumínio e para o aço, sendo descritos, na tabela 7.11, os valores máximos de tensão e deformação plástica, obtidos para ambos.

Tabela 7.11 Efeito do tipo de material na tensão de von Mises e na deformação plástica.

Material	Tensão von Mises (MPa)	Deformação plástica	Recuperação elástica (°)
AISI 1010	554.7	0.3080	2.2078
AL2024-T3	564.0	0.4057	6.1667

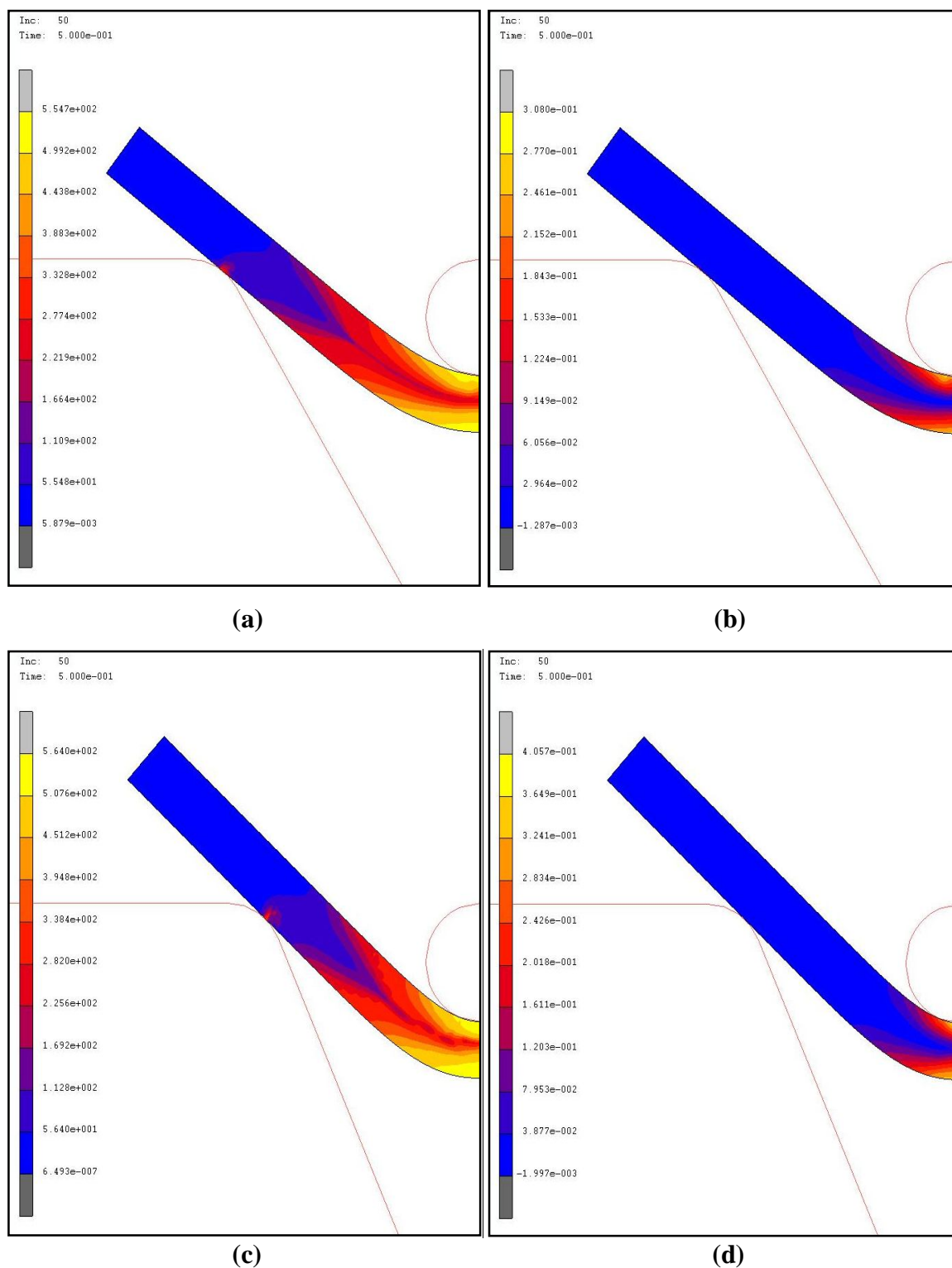


Figura 7.11 Efeito do tipo de material na tensão de von Mises: a) AISI 1010, c) AL2024-T3; e na deformação plástica equivalente: b) AISI 1010, d) AL2024-T3.

Através da tabela 7.11 verifica-se a mesma tendência observada para o estudo do efeito da profundidade de quinagem na recuperação elástica, ou seja obtém-se uma

recuperação elástica maior para o material que mais deforma plasticamente (alumínio). Isto acontece devido ao facto do alumínio absorver uma maior quantidade de energia de deformação plástica como ilustra a figura 7.12. Quando esta energia é libertada, resulta numa recuperação elástica maior para o alumínio.

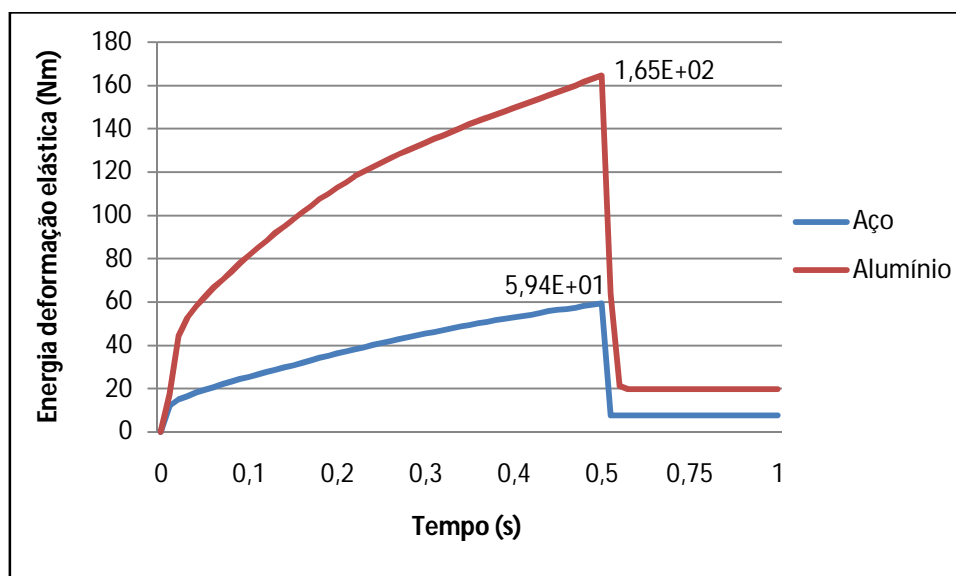
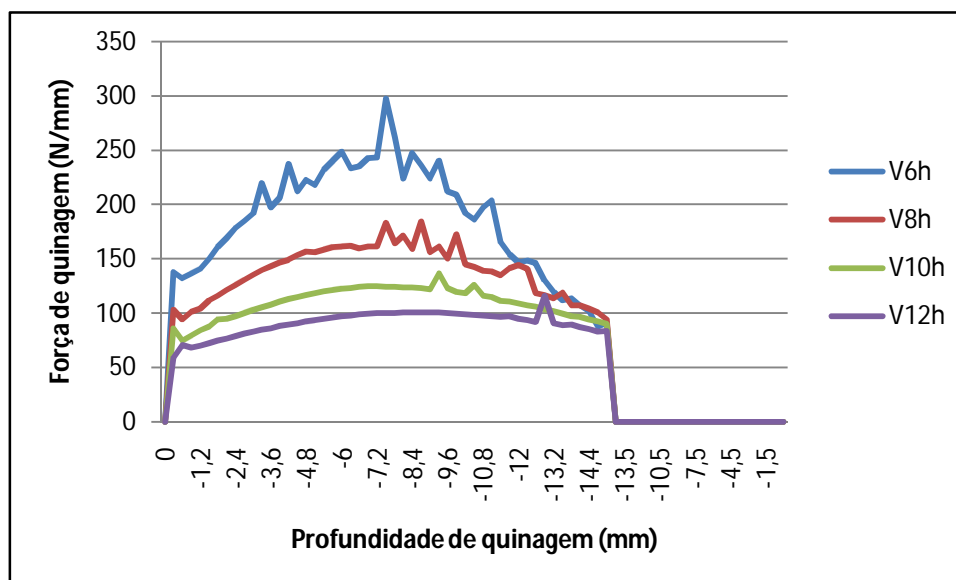


Figura 7.12 Comparativo da energia de deformação elástica entre o aço AISI 1010 e o alumínio AL2024-T3.

7.8. Força de quinagem

Os resultados expostos neste ponto, consistem na apresentação da força máxima de quinagem em função de algumas características e dimensões da chapa a conformar.

A figura 7.13 é representativa do perfil da força de quinagem (por unidade de largura) necessária para a conformação de chapa de aço, AISI 1010, com propriedades descritas em §6.3. É possível verificar através das figuras seguintes que a força de quinagem depende significativamente da abertura da matriz e da espessura da chapa.



7.13 Perfil de força de quinagem, necessária para conformação de chapa de 3 mm de espessura, em função de parâmetros de quinagem considerando um punção com 3mm de raio.

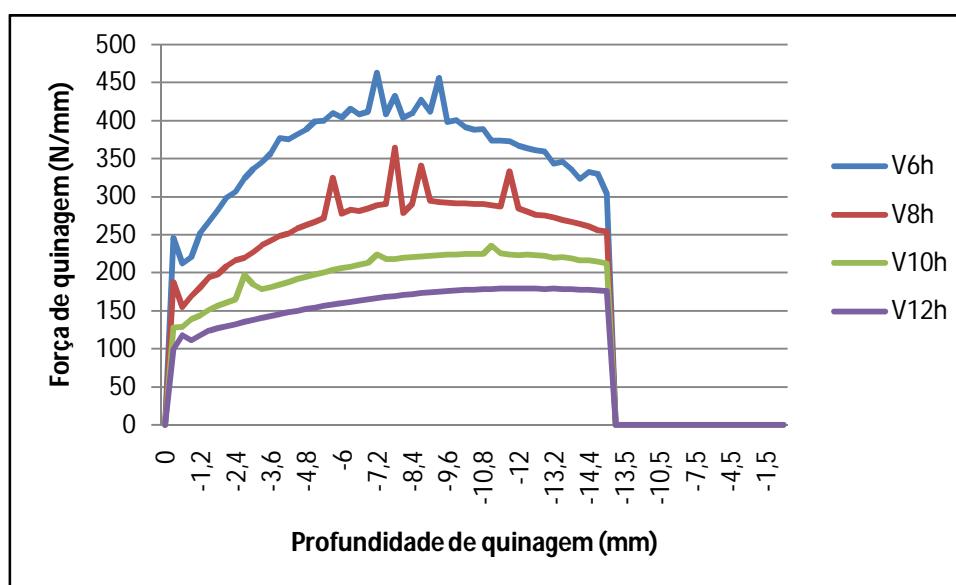


Figura 7.14 Perfil de força de quinagem, necessária para conformação de chapa de 5 mm de espessura, em função de parâmetros de quinagem considerando um punção com 3mm de raio.

Relativamente à espessura de chapa considerada verifica-se obviamente que as chapas de maior espessura requerem mais força para a conformação das mesmas, sendo necessária no caso das espessuras consideradas uma força para chapa com espessura de 5 mm superior em aproximadamente 46% relativamente à força necessária para a conformação de chapas com 3 mm.

8. Conclusão

8.1. Conclusões gerais

Este trabalho visou a análise de máquinas ferramentas (quinadoras) para conformação de chapa metálica fina e o estudo do fenómeno da recuperação elástica das chapas quinadas através do processo tecnológico de quinagem em V no ar. As análises foram realizadas através da utilização de simulações numéricas, utilizando-se para o efeito o software comercial de elementos finitos MSC.Marc 2005.

Neste estudo foi mostrada, através de simulações numéricas, a influência que os parâmetros de quinagem têm sobre o fenómeno da recuperação elástica.

Foi possível verificar que a recuperação elástica das chapas quinadas varia da seguinte forma:

- relativamente à abertura da matriz, notou-se que a recuperação elástica aumenta com o aumento da abertura da matriz, sendo este um dos parâmetros que apresentou maior influência na recuperação elástica;
- relativamente ao raio do punção, verificou-se uma influência pouco significativa na recuperação elástica, notando-se para o efeito que punções com raio maior causam maior recuperação elástica nas chapas quinadas;
- no que refere à profundidade de quinagem, é possível observar que o retorno elástico é tanto maior quanto maior for a profundidade de quinagem, apesar de se deformar mais plasticamente, o material para profundidades de quinagem maiores armazena uma quantidade de energia de deformação elástica maior, que quando libertada origina maior recuperação elástica da chapa;
- foi possível comprovar que a espessura da chapa é um dos parâmetros fundamentais que se deve ter em conta na quinagem, sendo verificado que a recuperação elástica diminui para chapas com espessuras maiores. A deformação plástica sofrida pelas mesmas é superior às das chapas mais finas;
- quanto ao atrito, realizou-se um estudo comparativo de simulações com e sem atrito e foi possível constatar que este não tem grande impacto sobre recuperação elástica das chapas;
- por fim verificou-se que o fenómeno da recuperação elástica é fortemente influenciado pelo tipo de material utilizado, sendo no caso deste trabalho maior para o

alumínio. Apesar deste se deformar mais plasticamente, verificou-se que a energia de deformação elástica absorvida por este é muito superior à armazenada pelo aço.

Foi possível verificar através do perfil de forças obtido, que a força é tanto maior quanto menor for a abertura da matriz, sendo este parâmetro o que apresentou maior variação do perfil de forças do processo de quinagem. Finalmente verificou-se uma dependência da força relativamente às espessuras de chapa utilizadas, tendo-se verificado maiores forças de quinagem para chapas mais espessas.

Relativamente à análise estrutural, foi possível verificar que através de métodos simples se obteve uma boa solução relativamente à rigidez e à distorção, o que para este tipo de máquinas é extremamente importante.

Importa ainda salientar que a simulação numérica do processo tecnológico de quinagem metálica constitui uma ferramenta de extrema importância para o desenvolvimento de novas ferramentas (punção, matriz), permitindo uma avaliação rápida os diversos parâmetros intrínsecos do processo de quinagem, projectando as ferramentas do processo com vista a economia e optimização dos recursos disponíveis.

8.2. Trabalhos futuros

O objectivo desta tese foi o de estudar o mecanismo de desenvolvimento do processo de quinagem em chapas metálicas. Foi propósito investigar o sistema de forças necessárias à obtenção de elementos estruturais quinados em função do comportamento constitutivo do material. Foi igualmente objectivo o estudo da geometria da chapa na etapa pós quinagem, nomeadamente, a recuperação elástica. Os resultados obtidos são representativos do início de um longo caminho a percorrer até ao desenvolvimento de sistemas numéricos capazes de reproduzir de forma fiável os fenómenos que acontecem durante e após conformação de chapas através do processo tecnológico de quinagem. Assim sendo, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- desenvolvimento e validação de ferramentas numéricas para a simulação do processo de quinagem considerando que o punção e a matriz também se deformam durante o processo de quinagem de chapa metálica;
- utilização de uma gama mais vasta de materiais constituintes da chapa metálica, com vista a obtenção de uma base de dados relativamente ao retorno elástico obtido em cada simulação e respectiva correcção;

- simulação da dobração de chapa através de outros tipos de quinagem, de modo a verificar quais os processos mais eficientes;
- desenvolvimento de modelos matemáticos (recorrendo à matemática inversa) capazes estudar e prever o retorno elástico, para cada mm de profundidade e consegui-lo compensando essa recuperação elástica através da alteração dos parâmetros tecnológicos que mais o influenciam e que foram objecto de estudo neste trabalho;
- validação experimental do processo de quinagem e do estudo da recuperação elástica seria uma mais valia para este trabalho.

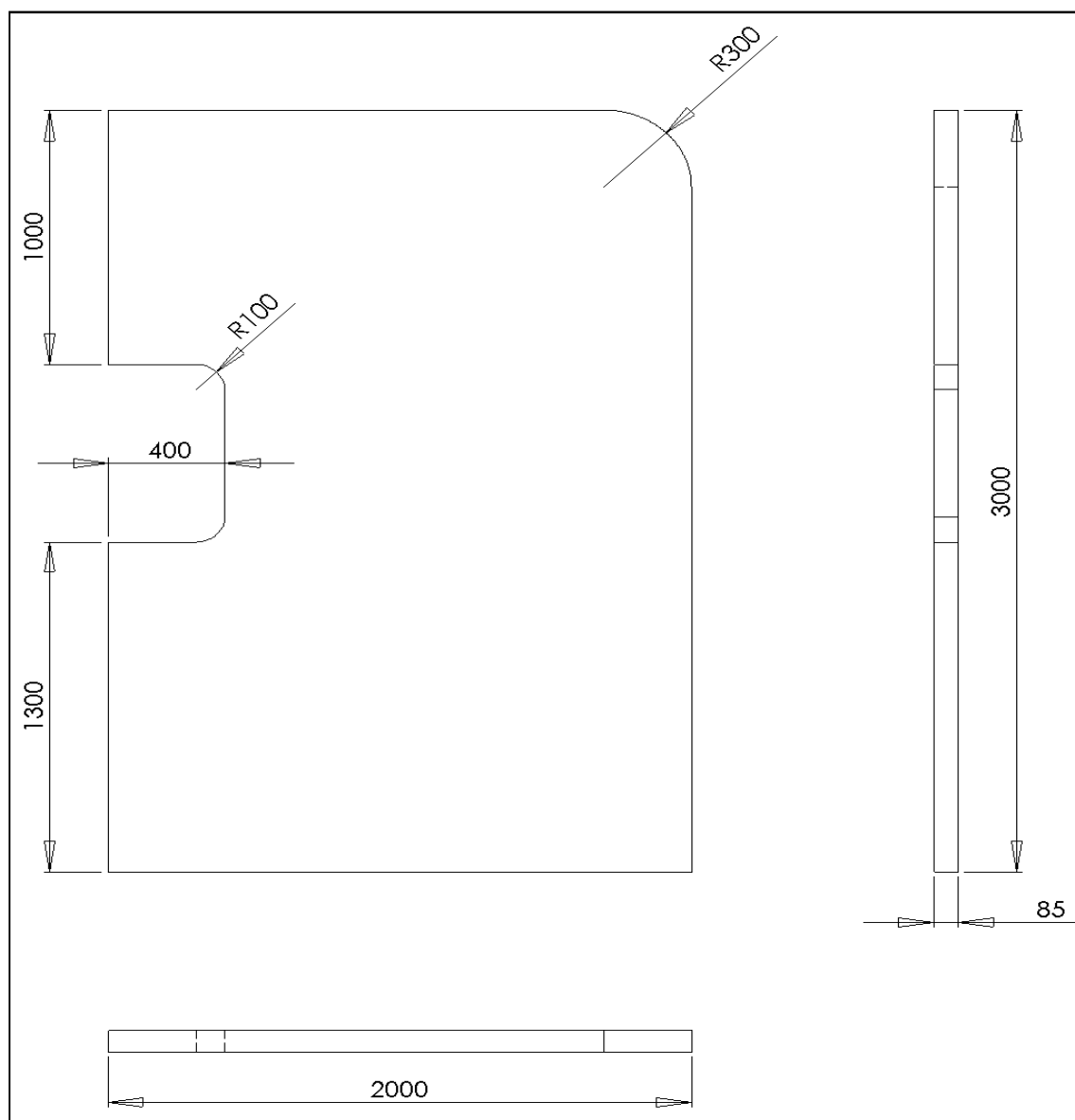
Referências

1. Rodrigues, J. and P. Martins, *Tecnologia da Deformação Plástica*. Vol. 2. 2005.
2. Lascoe, O., *Handbook of fabrication processes*. 1988: Asm Intl.
3. Rapien, B.L., *Fundamentals of press brake tooling: the basic information you need to know in order to design and form good parts*.
4. GmbH, S., *Metal forming handbook*. 1998: Springer Verlag.
5. Suchy, I., *Handbook of die design*. 1997: McGraw-Hill.
6. Bralla, J.G., *Handbook of Manufacturing Processes*. 2006. 33-86.
7. Rodrigues, J. and P. Martins, *Tecnologia da Deformação Plástica*. Vol. 1. 2005.
8. Marciniak, Z., J. Duncan, and J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*. 2002: Butterworth-Heinemann.
9. Fei, D. and P. Hodgson, *Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels*. Nuclear Engineering and Design, 2006. 236(18): p. 1847-1851.
10. Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*. 3 ed. 1986: McGraw-Hill Book Company.
11. Creese, R., *Introduction to manufacturing processes and materials*. 1999: CRC.
12. Walker, J., *Handbook of manufacturing engineering*. 1996: Marcel Dekker Inc.
13. AVALONE, E.A. and T.B. III, *MARKS' STANDARD HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS*. Tenth ed. 2002: MCGRAW-HILL.
14. Timoshenko, S.P.G., J. N., *Theory of Elasticity*. Third Edition ed. 1988: McGraw-Hill, 1988.
15. Azevedo, Á.F.M., *MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS*. 1 ed. 2003: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
16. Cook, R.D.M., D. S.; Plesha, M. E.; Witt, R. J., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Fourth ed. 2002: John Wiley & Sons, Inc.
17. Esat, V., H. Darendeliler, and M. Gokler, *Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets*. Materials & Design, 2002. 23(2): p. 223-229.
18. *Matweb, Your Source for Materials Information* Available from: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761&ckck=1>.
19. MSC.Marc, *Element library Version 2005*. Volume B.

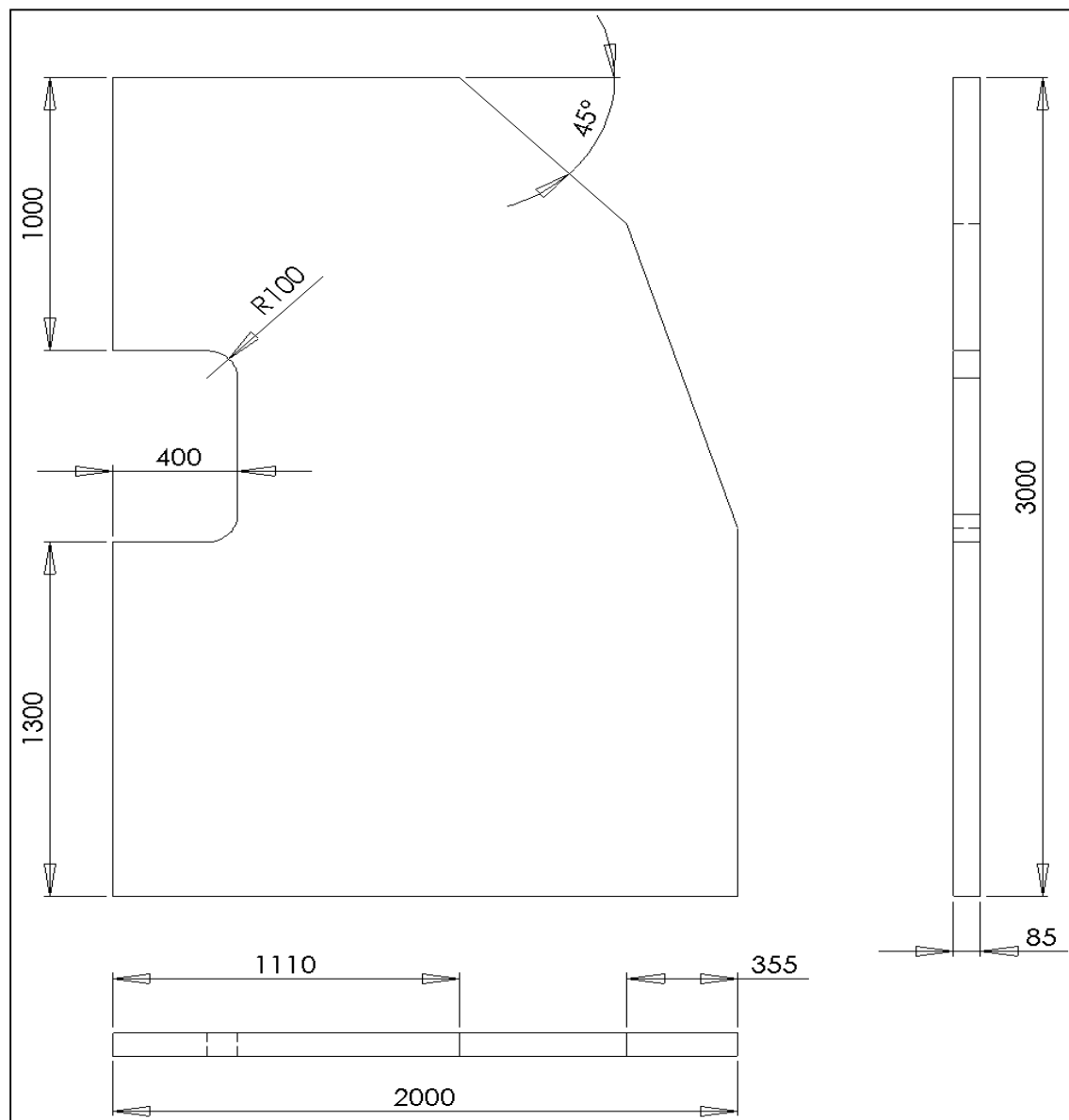
Anexos

Anexo A. Cotagem dos componentes utilizados na análise estrutural da quinadora

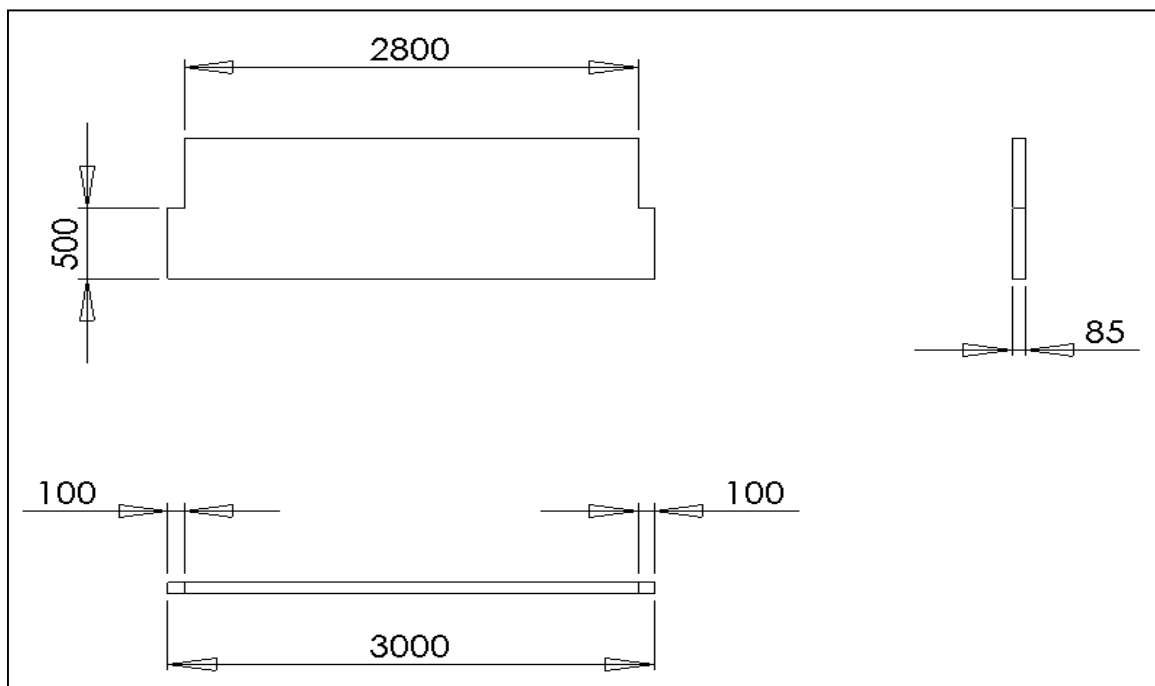
A.1 Montante



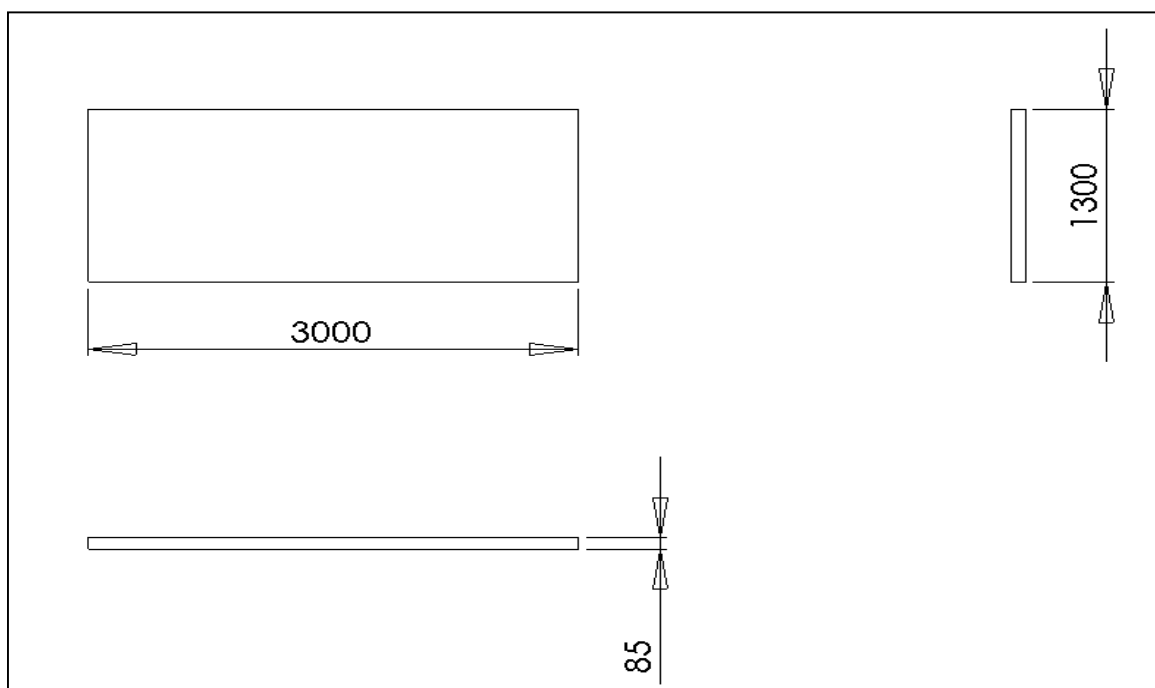
A.2 Montante otimizado



A.3 Avental móvel



A.4 Avental fixo



A.5 Avental fixo otimizado

